

EDITORIAL

INVESTIGACIÓN

Sistemas piezoeléctricos en el tren urbano de Guadalajara, México: entropía y negentropía

Piezoelectric systems in the urban train of guadalajara, Mexico: entropy and negentropy

ARTURO ARIZAGA BARRAGÁN, MARIO GUADALUPE GONZÁLEZ PÉREZ, YEFER ASPRILLA LARA

Desarrollo y fabricación de un microsensor de gas de baja potencia para la detección de amoníaco a bajas concentraciones

Development and manufacture of a low power gas microsensor for the detection of ammonia at low concentrations

DANIEL RODRÍGUEZ, JUAN BONAPARTE, NORBERTO BOGGIO, ALEJANDRO FASCISZEWSKI

Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo

Construction and evaluation of a high voltage divider for lightning impulse tests

JUAN DAVID MINA-CASARAN, DIEGO FERNANDO GARCÍA, DIEGO FERNANDO ECHEVERRY

10 Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica 45

Andesite rock fracture and spectral analysis of acoustic emission signals

DINO ALBERTO FILIPUSI, JUAN PABLO MUSZKATS, MIRYAM PATRICIA SASSANO, ; MIGUEL EDUARDO ZITTO, ROSA PIOTRKOWSKI

13 ESTUDIO DE CASO 57

Ajuste de la protección de sobreexcitación ANSI 24 para un generador sincrónico en un relé SIEMENS 7UM62

Adjusting ANSI 24 overexcitation protection in a synchronous generator for a SIEMENS 7UM62 relay

NAVIVER GLADYS CAICEDO DELGADO, CARLOS ALBERTO ANDRADE

69 Instrucciones para los autores 77

Instructions for authors

Tecnura

Revista Tecnura • Volumen 23 – Número 61 • Julio – Septiembre de 2019  
p-ISSN: 0123-921X • e-ISSN: 2248-7638 • Bogotá D.C. Colombia

# Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

p-ISSN: 0123-921X  
Volumen 23 - Número 61  
Julio – Septiembre de 2019

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Desarrollo y fabricación de un microsensor de gas de baja potencia para la detección de amoníaco a bajas concentraciones

Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo

Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica

ISSN 0123-921X



9 770123 921001



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
Acreditación Institucional de Alta Calidad

# **Tecnura**

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

Volumen 23 - Número 61  
Julio – Septiembre de 2019

p-ISSN: 0123-921X  
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Revista *TECNURA***  
**Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento**  
**Universidad Distrital Francisco José de Caldas**  
**Facultad Tecnológica**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

**EDITOR**

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

**COMITÉ EDITORIAL**

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Diego Luis González  
Consiglio Nazionale delle Ricerche. Italia

Ph.D. Julyan Cartwright  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España

Ph.D. Oreste Piro  
Universidad de les Illes Balears. España

**COMITÉ CIENTÍFICO**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Martín Pedro Gómez  
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

**EVALUADORES**

PhD. Federico Carini  
Universidad Nacional de San Luis. Argentina

PhD. Germán Bianchini  
Universidad Tecnológica Nacional. Argentina

PhD. Martin Gómez  
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

PhD. Paola Caymes-Scutari  
Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina

MSc. Laura Ximena Giral  
Universidad de Manizales. Colombia

MEng. Alvaro Rodríguez Paez  
Escuela de Ingenieros Militares. Colombia

MEng. Helmuth Ortiz  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas,  
Colombia

MEng. Sergio Alexander Aristizabal Narvaez  
EPSA, Colombia

MEng. Jose David Cortes  
Universidad Industrial De Santander. Colombia

**ASISTENTES DE LA REVISTA TECNURA**

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

**COORDINACIÓN EDITORIAL**

Fernando Piraquive  
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico-CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Volumen 23 - Número 61

Julio – Septiembre de 2019

## REVISTA *TECNURA*

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. 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

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

## COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

## MISIÓN

La revista *Tecnura* tiene como misión divulgar resultados de proyectos 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.

## PÚBLICO OBJETIVO

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

## INDEXACIÓN

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en los índices regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCopernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

## FORMA DE ADQUISICIÓN

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

## SUSCRIPCIÓN

El precio unitario de la revista es de 10000 pesos (el precio no incluye el valor del envío). La suscripción anual tiene un costo de 45000 pesos para Colombia, 40 USD para América Latina y el Caribe, 60 USD para otras regiones (el precio incluye el valor del envío). Para suscribirse utilice el formato ubicado al final de la revista.

## REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando 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 de la revista.

## DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ing. Cesar Augusto García Ubaque,  
Ph.D. Director y Editor Revista *Tecnura*  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A-35 sur  
Teléfono: 571-3238400, extensión: 5003  
Celular: 57-3153614852  
Bogotá, D.C., Colombia  
Correo electrónico:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
*Tecnura* en internet:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## DISEÑO ORIGINAL

Julián Hernández-Taller de Diseño

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

Fernando Carretero Padilla

## CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLES

Laura Ximena García

## DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO DE CUBIERTA

Julián Hernández-Taller de Diseño  
[director@julianhernandez.co](mailto:director@julianhernandez.co)





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Tecnura**  
**Technology And Culture, Affirming Knowledge**  
**District University Francisco José De Caldas**  
**Faculty Of Technology**

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

**EDITOR**

Ph.D. Ing. Cesar Augusto García Ubaque  
District Francisco José de Caldas University. Colombia

**EDITORIAL COMMITTEE**

Ph.D. Ing. José Antonio Velásquez Costa  
Universidad Ricardo Palma, Perú

Ph.D. Ing. Johan José Sánchez Mora  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Ph.D. Ing. Mario Ricardo Arbulu Saavedra  
Universidad de La Sabana, Colombia

Ph.D. Ing. Edgar Francisco Vargas  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Ing. Ingrid Patricia Páez Parra  
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto García Ubaque  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Ing. César Augusto Hernández Suárez  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Ph.D. Diego Luis González  
Consiglio Nazionale delle Ricerche. Italia

Ph.D. Julyan Cartwright  
Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España

Ph.D. Oreste Piro  
Universidad de les Illes Balears. España

**SCIENTIFIC COMMITTEE**

Ph.D. Ing. Enrique Rodríguez de la Colina Universidad  
Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Alfonso Prieto Guerrero  
Universidad Autónoma Metropolitana, México

Ph.D. Ing. Fernando Martirena  
Universidad Central de Las Villas, Cuba

Ph.D. Ing. Juan Antonio Conesa  
Universidad de Alicante, España

Ph.D. Ing. Steven M. LaValle  
University of Illinois, Estados Unidos

Ph.D. Ing. Manuel Karim Sapag  
Universidad Nacional de San Luis, Argentina

Ph.D. Ing. Jorge Mario Gómez  
Universidad de Los Andes, Colombia

Ph.D. Martín Pedro Gómez  
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

**EVALUATORS**

PhD. Federico Carini  
Universidad Nacional de San Luis. Argentina

PhD. Germán Bianchini  
Universidad Tecnológica Nacional. Argentina

PhD. Martin Gómez  
Comisión Nacional de Energía Atómica. Argentina

PhD. Paola Caymes-Scutari  
Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina

MSc. Laura Ximena Giral  
Universidad de Manizales. Colombia

MEng. Alvaro Rodriguez Paez  
Escuela de Ingenieros Militares. Colombia

MEng. Helmuth Ortíz  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

MEng. Sergio Alexander Aristizabal Narvaez  
EPSA, Colombia

MEng. Jose David Cortes  
Universidad Industrial De Santander. Colombia

**TECNURA JOURNAL ASSISTANTS**

MEng. Diego Armando Giral Ramírez

**EDITORIAL COORDINATION**

Fernando Piraquive  
Centro de investigaciones y desarrollo tecnológico - CIDC  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

# Tecnura

Volumen 23 - Número 61

July – September of 2019

## TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

## PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

## THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

## MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project 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.

## TARGET AUDIENCE

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

## INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

## FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

## SIGN UP

The unit price of the journal is 6 USD (the price does not include shipping). The annual sign up is 28 USD for Colombia; 40 USD in Latin America and the Caribbean; 60 USD in other regions (the price includes shipping). To sign up, use the format located at the end of the journal.

## REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles 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.

## POSTAL ADDRESS

Send to Engr. Cesar Augusto García Ubaque, Ph.D. Director and Editor Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70B No. 73A - 35 sur  
Telephone Number: 571 - 3238400, extension: 5003  
Cell phone Number: 57 - 3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
E-mail:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Tecnura on internet: <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## ORIGINAL DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño  
[director@julianhernandez.co](mailto:director@julianhernandez.co)

## STYLE CORRECTION IN SPANISH

Fernando Carretero Padilla

## STYLE CORRECTION IN ENGLISH

Laura Ximena García

## LAYOUT AND TITLE PAGE DESIGN

Julián Hernández - Taller de Diseño

## DECLARACIÓN DE ÉTICA Y BUENAS PRÁCTICAS

El comité editorial de la revista *Tecnura* 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 *Tecnura* 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

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

La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluían graves circunstancias.

### Relaciones con los evaluadores

*Tecnura* 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

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

### Reclamaciones

*Tecnura* 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

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

### Protección de datos individuales

*Tecnura* 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

*Tecnura* 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. *Tecnura* 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

*Tecnura* 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

The editorial board of *Tecnura* 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, *Tecnura* 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 research and their role in the research.

### Relations with authors

*Tecnura* 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

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

### Peer review process

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

### Claims

*Tecnura* 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

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

### Protection of individual data

*Tecnura* 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

*Tecnura* 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. *Tecnura* 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

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

### Complaints / allegations

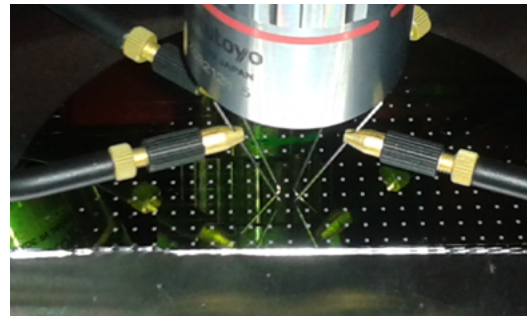
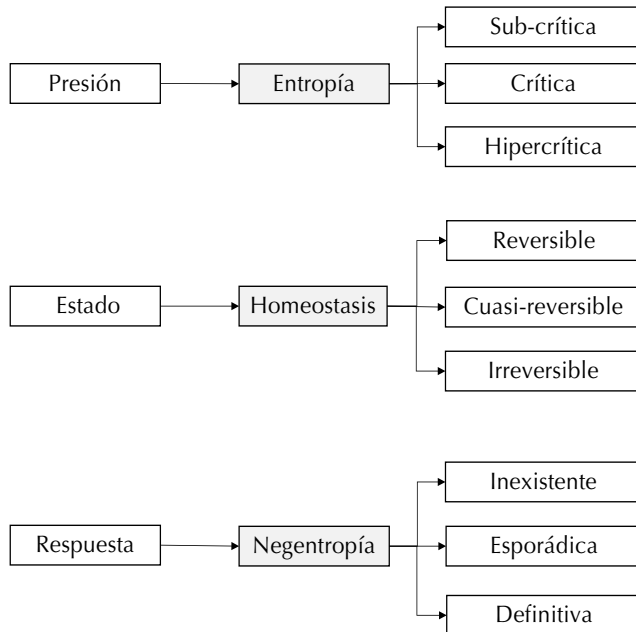
Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

# Contenido

---

## EDITORIAL

10



## Desarrollo y fabricación de un microsensor de gas de baja potencia para la detección de amoníaco a bajas concentraciones

23

Development and manufacture of a low power gas microsensor for the detection of ammonia at low concentrations

DANIEL RODRÍGUEZ, JUAN BONAPARTE, NORBERTO BOGGIO, ALEJANDRO FASCISZEWSKI

---

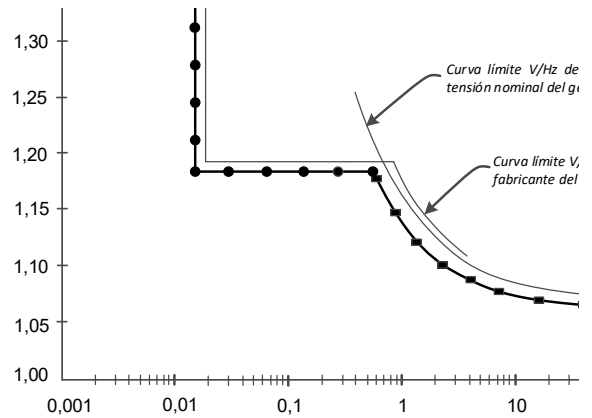
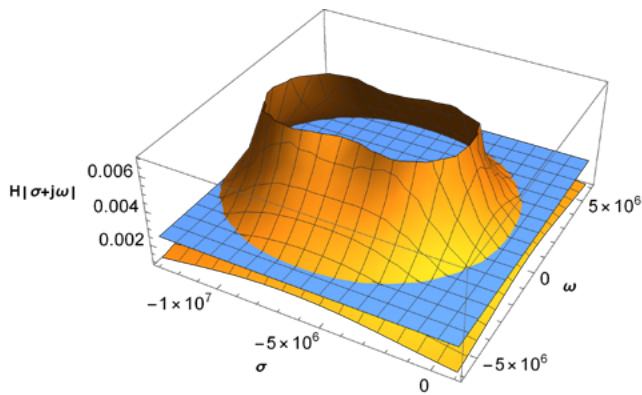
## Sistemas piezoeléctricos en el tren urbano de Guadalajara, México: entropía y negentropía

13

Piezoelectric systems in the urban train of Guadalajara, Mexico: entropy and negentropy

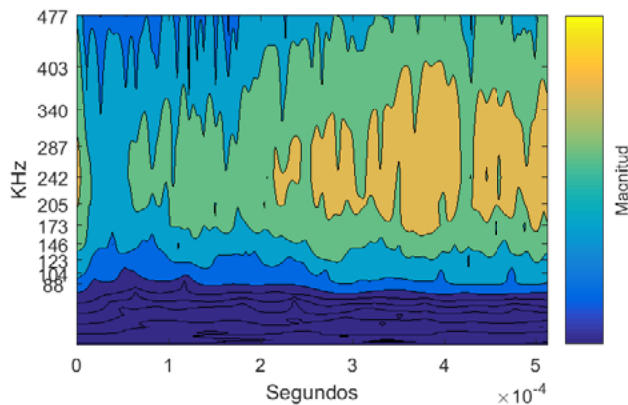
ARTURO ARIZAGA BARRAGÁN, MARIO GUADALUPE GONZÁLEZ PÉREZ, YEFER ASPRILLA LARA

---



**Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo** 31  
 Construction and evaluation of a high voltage divider for lightning impulse tests  
 JUAN DAVID MINA-CASARAN, DIEGO FERNANDO GARCÍA, DIEGO FERNANDO ECHEVERRY

**Ajuste de la protección de sobreexcitación ANSI 24 para un generador sincrónico en un relé SIEMENS 7UM62** 57  
 Adjusting ANSI 24 overexcitation protection in a synchronous generator for a SIEMENS 7UM62 relay  
 NAYIVER GLADYS CAICEDO DELGADO, CARLOS ALBERTO ANDRADE



**Instrucciones para los autores** 69  
**Instructions for authors** 77

**Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica** 45  
 Andesite rock fracture and spectral analysis of acoustic emission signals  
 DINO ALBERTO FILIPUSSI, JUAN PABLO MUSZKATS, MIRYAM PATRICIA SASSANO, ; MIGUEL EDUARDO ZITTO, ROSA PIOTRKOWSKI

## EDITORIAL

---

Uno de los materiales más requeridos y utilizados en el sector de la construcción es el acero. La producción de aceros en el mundo la lidera china con una participación del 50% del mercado global, seguida por la Unión Europea y la India. En América latina, Colombia es el cuarto país en la producción de metales y el sexto en la producción de hierro y acero. Este sector representa para el país un 0,7% del PIB total, generando 40.000 empleos directos e indirectos. En el sector industrial, las siderúrgicas representan el 0,8% de empleos directos e indirectos en el país según la última encuesta anual Manufactura de 2016, representando cerca del 6,6% del PIB industrial para Colombia. Para promover la producción local de aceros, Colombia ha incrementado los aranceles desde el 2011 a la fecha cerca del 30%, afectando el precio de los productos cuyas materias primas son los metales. Adicionalmente, el sector metalúrgico ha registrado un comportamiento negativo en los últimos años, de manera que el PIB de los productos metalúrgicos básicos registró el peor desempeño entre los subsectores industriales con 10,4% en el 2017 (muy por debajo de la caída de 1% de la industria y del crecimiento de 1,8% del PIB total), mientras que la producción de artículos elaborados de metal registró crecimientos positivos.

Por otro lado, a pesar de seguir siendo adecuados para la construcción de componentes de máquinas y elementos estructurales, es importante tener en cuenta que los materiales metálicos han presentado a lo largo de su historia importantes roturas incluidas algunas originadas por procesos de fatiga. Esto produce inevitablemente elevados sobrecostos por el daño

abrupto o impredecible de elementos mecánicos o, en el peor de los casos, pérdidas humanas. Por lo tanto, la aplicación y desarrollo de nuevas aleaciones Fe-Mn-Al-C constituye un reto tecnológico que requiere de la caracterización de sus propiedades mecánicas y micro-estructurales para que los diseñadores de estructuras, dispositivos y máquinas, puedan considerarlo como un material confiable que pueda ser especificado para sus diseños. A nivel industrial, es conocido que gran parte de las fallas prematuras de los componentes de máquinas o estructuras son causadas por el fenómeno de fatiga. Adicionalmente, los elementos de estructuras y máquinas requieren mayores periodos de vida bajo condiciones de carga cíclica (fatiga), lo que ha impulsado que se adelanten grandes esfuerzos investigativos a nivel mundial para obtener materiales con excelente combinación de propiedades mecánicas; sin embargo, los ensayos convencionales de fatiga requieren costosos cuerpos de prueba y ensayos prolongados en el tiempo.

Los sectores metalmecánico y de construcción podrían fortalecerse con la contribución en investigación y desarrollo por parte de la academia si parte de las 70 mil toneladas por año de aceros que hoy son importados se produjeran en el país. De esta forma, se agregaría valor a los recursos no renovables como el Hierro, el Manganeseo, el Aluminio y el Carbón (Fe-Mn-Al-C, que actualmente son exportados como *commodities* y extraídos en Colombia como materia prima a un bajo costo), y se utilizarían en estas nuevas aleaciones, contribuyendo así al fortalecimiento de sectores estratégicos e incrementando la competitividad del país.

**CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE**  
Director

## EDITORIAL

---

One of the most required and used materials in construction is steel. China leads steel production in the world (with a 50% share of the global market), followed by the European Union, and India. In Latin America, Colombia is the fourth country that produces metals and the sixth that produces iron and steel. This sector represents 0.7% of the country's total GDP, generating 40,000 direct and indirect jobs. According to the latest annual Manufacturing Survey of 2016, steelmakers represent 0.8% of direct and indirect jobs in the country, representing about 6.6% of the GDP of Colombia's industrial sector. To promote local steel production, Colombia has increased tariffs to about 30% since 2011, affecting the price of products made of metals. Additionally, the metallurgical sector has registered a negative behavior in recent years, so that the GDP of basic metallurgical products registered the worst performance among the industrial subsectors with 10.4% in 2017 (well below the fall of 1 % of industry and growth of 1.8% of total GDP), while the production of fabricated metal articles registered positive growth.

On the other hand, despite continuing to be suitable for the construction of machine components and structural elements, it is important to keep in mind that metal materials have presented significant breaks throughout history, including some caused by fatigue processes. This inevitably produces high cost overruns due to abrupt or unpredictable damage to

mechanical elements or, in the worst case, human losses. Therefore, the application and development of new Fe-Mn-Al-C alloys is a technological challenge that requires the characterization of its mechanical and microstructural properties so that designers of structures, devices and machines can consider it as a reliable material that can be specified for your designs. On an industrial level, it is known that much of the premature failures of machine or structure components are caused by the fatigue phenomenon. Additionally, the elements of structures and machines require longer periods of life under conditions of cyclic loading (fatigue), which has led to great research efforts worldwide to obtain materials with excellent combination of mechanical properties; however, conventional fatigue tests require expensive test bodies and prolonged tests over time.

The metalworking and construction sectors could be strengthened with the contribution in research and development by the academy if part of the 70 thousand tons per year of steels that are imported today were produced in the country. In this way, value would be added to non-renewable resources such as Iron, Manganese, Aluminum, and Carbon (which are currently exported as commodities and extracted in Colombia as raw material at a low cost) and would be used in these new alloys. This would contribute to strengthening strategic sectors and increasing the country's competitiveness.

**CÉSAR AUGUSTO GARCÍA-UBAQUE**  
Director







## Sistemas piezoeléctricos en el tren urbano de Guadalajara, México: entropía y negentropía

### Piezoelectric systems in the urban train of guadalajara, Mexico: entropy and negentropy

Arturo Arizaga Barragán<sup>1</sup>, Mario Guadalupe González Pérez<sup>2</sup>, Yefer Asprilla Lara<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 12 de febrero de 2019

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2019

**Como citar:** Arizaga B., A., González P., M.G. y Asprilla L., Y. (2019). Sistemas piezoeléctricos en el tren urbano de Guadalajara, México: entropía y negentropía. *Tecnura*, 23(61), 13-22. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.14870>

#### Resumen

**Contexto:** La homeostasis del tren urbano de Guadalajara, México, experimenta entropía relativa a la aglomeración de usuarios en las denominadas horas pico. Esto conlleva un mayor consumo de energía eléctrica en los desplazamientos cotidianos; no obstante, el peso proveniente de los usuarios puede ser utilizado como negentropía termodinámica para reducir sus niveles de entropía. En este sentido, el objetivo de esta investigación determina la viabilidad de utilizar la piezoelectricidad en la obtención y consumo de energía eléctrica para la operatividad del sistema.

**Método:** La investigación se fundamenta en datos proporcionados por el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (Siteur) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Complementariamente, esta información se triangula con datos realizados en ejercicios de campo y en función de la oferta y demanda energética; se calculan el peso aproximado de los usuarios y la energía que puede producir el sistema de generación piezoeléctrica por persona. Finalmente, es utilizado

el modelo entropía-homeostasis-negentropía (EHN), para determinar el escenario de la piezoelectricidad en el consumo energético del tren eléctrico urbano de la metrópoli de Guadalajara.

**Resultados:** La utilización de piezoelectricidad puede lograr eficiencias significativas para la optimización energética de sistemas de movilidad urbana; inclusive de hasta un 89,7 % como en el ejemplo de la línea 2 del Siteur en Guadalajara. Esto por las condiciones homeostáticas propias de este sistema, relativas a la afluencia promedio diaria en horas pico; cuando se llega a los 83.059 usuarios. Por tanto, es posible generar negentropía termodinámica, a través de la energía eléctrica proveniente de los sistemas piezoeléctricos y el peso de los usuarios.

**Conclusiones:** La energía autoproducida por piezoelectricidad en el sistema, mediante el aprovechamiento del peso de los usuarios puede ser almacenada para alimentar la líneas de la red del tren eléctrico urbano. De esta manera, se optimiza el consumo energético en los desplazamientos cotidianos, con ahorros económicos para la empresa y

1 Ingeniero en Energía, División de Ingenierías e Innovación Tecnológica. Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México. Contacto: [arturo.arizaga@alumno.udg.mx](mailto:arturo.arizaga@alumno.udg.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3109-4375>

2 Ingeniero civil, maestro en Ingeniería, doctor en Ciudad, Territorio y Sustentabilidad. Profesor titular, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara. Guadalajara, México. Contacto: [mario.gonzalez@academico.udg.mx](mailto:mario.gonzalez@academico.udg.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5457-5948>

3 Ingeniero civil, especialista en Infraestructura Vial, magíster en Ingeniería Civil, candidato a doctor en Movilidad Urbana, Transporte y Territorio. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Contacto: [yasprilla@udistrital.edu.co](mailto:yasprilla@udistrital.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6569-7441>

como negentropía en la reducción de la energía no utilizada para producir trabajo (entropía).

**Palabras clave:** entropía, negentropía, piezoelectricidad, consumo energético, tren eléctrico

### Abstract

**Context:** The homeostasis of the Urban Train of Guadalajara (Mexico) experiences entropy relative to the conglomeration of users in the so-called rush hours. This leads to greater consumption of electrical energy in daily commutes; however, the weight coming from users can be used as thermodynamic negentropy to reduce their entropy levels. Therefore, the objective of this research is to determine the feasibility of using piezoelectricity in obtaining and consuming electrical energy for the operation of the system.

**Method:** The research is based on the data provided by the Urban Electric Train System (SITEUR, in Spanish) and the Federal Electricity Commission (CFE). This information is triangulated along with data obtained in field exercises, and based on energy the supply and demand; then, the approximate weight of the users and the energy that the piezoelectric generation system can produce per person are calculated.

Finally, the Entropy-Homeostasis-Negentropy (EHN) model is used to determine the homeostasis of piezoelectricity in the energy consumption of the urban electric train in the metropolis of Guadalajara.

**Results:** The use of piezoelectricity can significantly improve efficiency and achieve energy optimization of urban mobility systems up to 89,7%; for example, the case of Line 2 of the SITEUR in Guadalajara. This improvement in efficiency is possible due to the homeostatic conditions of the system and the average influx during rush hours, when it reaches 83,059 users. Therefore, it is possible to generate thermodynamic negentropy through the electrical energy coming from the piezoelectric systems and the weight of the users.

**Conclusions:** The energy produced by piezoelectricity that makes use of the users' weight can be stored to power the lines of the urban electric train network. In this way, the efficiency of the energy consumption in daily commutes is improved, saving the company money and energy (through the reduced amount use of external energy to produce work).

**Keywords:** entropy, negentropy, piezoelectricity, energy consumption, electric train.

## INTRODUCCIÓN

En México, tres ciudades metropolitanas integran sistemas de transporte eléctrico a su movilidad urbana: Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. En cuanto a líneas de operación y movilidad de usuarios, el más grande es el Sistema de Transporte Colectivo de la Ciudad de México (Metro). Tan solo en 2006, el denominado Metro ocupó el tercer lugar a nivel mundial al transportar a una media de 3,9 millones de pasajeros al día; incluso, superando los metros de Nueva York, Moscú y Tokio. Asimismo, ese año obtuvo el quinto lugar en el mundo por la extensión de su red (Sistema de Transporte Colectivo, 2007).

En este contexto, en años recientes la metrópoli de Guadalajara ha evidenciado “insuficiencia y

deficiencia de conectividad, accesibilidad y medios adecuados de transporte” (González, 2016). Además, la urbe experimenta un incremento poblacional anual y según el Instituto de Información Estadística y Geografía del Estado de Jalisco (IIEG) ha llegado a los cinco millones de habitantes (IIEG, 2017), con más de dos millones de unidades vehiculares operando (De Quevedo, Asprilla y González, 2017, p. 138). Este escenario afecta los procesos de movilidad urbana supeditada a la automovilidad, debido a la afluencia de personas que intentan desplazarse diariamente desde sus orígenes a sus destinos, y provocan conflictos viales durante las denominadas *horas pico*. De esta manera, diferentes ciudades de carácter metropolitano supeditadas a la automovilidad han comprometido la sustentabilidad de sus recursos y han

ocasionado graves problemas de índole económica, social y ambiental.

El estado actual del sistema de movilidad urbana en la metrópoli de Guadalajara (homeostasis) se encuentra en desequilibrio dinámico, debido a que la entropía (desestabilización sistémica) generada por la industria inmobiliaria y su cadena de distribución, la industria automotriz y de autopartes, los proveedores del servicio de transporte, las empresas de venta de combustibles y lubricantes, y en general los intereses de los grupos que ostentan temporalmente la representación social son mayores a la capacidad de carga del sistema, y por tanto, rebasan al conjunto de fuerzas tendientes a generar neguentropía (estabilización sistémica). (García, González y Asprilla, 2018, p. 63)

En el ámbito económico se ha identificado una continua pavimentación y artificialización del suelo, grandes construcciones de concreto y asfalto, que ocasionan costos indirectos para el mantenimiento de la señalización, semaforización o conservación de la cubierta. En materia social se ha favorecido la accidentalidad y tiempos muertos ocasionados por la congestión del tráfico, daño físico o mental causado por la emisión de gases, ruido y estrés (González, 2018, p. 72). Asimismo, en el aspecto ambiental se han alterado muchas veces irreversiblemente la topografía del terreno natural, por medio de vibraciones inducidas por el tráfico pesado; eliminación de la cubierta vegetal –que incrementa la velocidad de las escorrentías superficiales y la erosión del suelo–; contaminación de los sistemas de drenaje a causa de los derivados del petróleo de la combustión interna de los vehículos; contaminación de cuerpos de agua, superficiales y freáticos por desechos sólidos urbanos adyacentes a las vías; entre otras fuentes contaminantes.

En un entorno con panoramas de gran oferta de energía y un crecimiento sostenido de la demanda, las políticas energéticas de los países desarrollados

deben llevar un equilibrio necesario entre los objetivos de aumento de competitividad medioambiental y seguridad en el abastecimiento. (Faure, 2004)

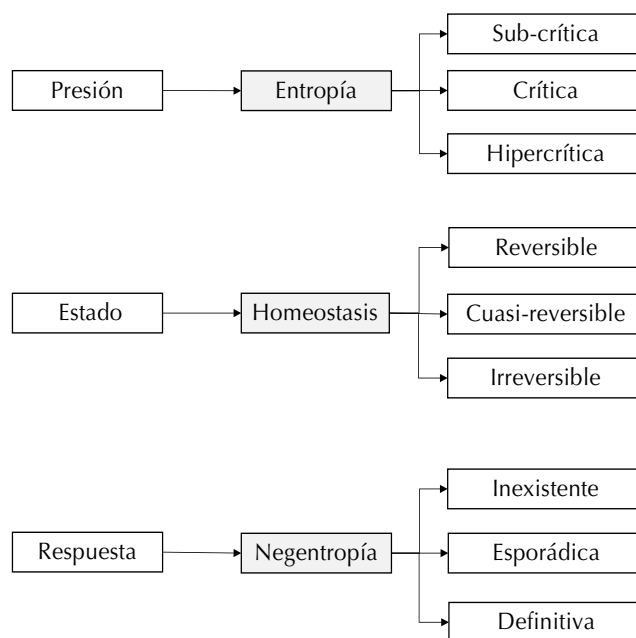
Los sistemas urbanos no dependientes de la automovilidad han venido a reducir la entropía; es decir, a producir negentropía termodinámica. Tal es el caso del denominado Sistema de Tren Eléctrico Urbano, el cual está constituido por dos líneas: a) línea 1 en sentido norte-sur, que transita desde la estación Periférico-Norte hasta la estación Periférico-Sur, contiene 19 estaciones en 15,5 km de longitud, y b) línea 2 en sentido occidente-oriental, parte desde la estación Juárez hasta la estación Tetlán, y cuenta con 10 estaciones en 8,5 km de longitud. Es uno de los transportes públicos mayormente utilizados por la población en la metrópoli; a tal grado, que en 2010 prestaba servicio alrededor de 240.000 usuarios diariamente (Mapa Metro, 2010), y para 2016, a más de 245,000 (ISA Corporativo, 2016).

El servicio del sistema de tren eléctrico de Guadalajara opera los 365 días del año, de lunes a domingos, con un horario de 5:00 horas a 23:00 horas. El recorrido que hacen los trenes en la línea 2 es de 36 minutos (ida y vuelta). Dentro del sistema de datos de Siteur se presenta información sobre la frecuencia de paso; es decir, en horas pico, la línea 2 mantiene una frecuencia de 3,35 minutos y en horas valle, de 6,00 a 7,15 minutos. En este sentido, se realizaron una serie de observaciones y mediciones cuantitativas el día martes 5 de diciembre de 2017; con el objetivo de comprobar la frecuencia de paso de los trenes en la hora pico, de las 18:40 hasta las 20:20 horas, considerando esta última hora, porque fue cuando se observó una considerable disminución la cantidad de usuarios que pretendían abordar el tren dentro de la estación Juárez en dirección a la estación Tetlán de la línea 2 de Siteur. Se decidió tomar como punto de partida la estación Juárez, debido que aquí es donde hacen intersección las dos líneas de tren ligero, por lo que cuenta con un gran flujo de usuarios dentro de la estación por los transbordos

que estos hacen, y además, se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de Guadalajara.

Con base en lo anterior, y considerando la segunda ley de Newton, se tiene que *a mayor peso (masa), mayor será el gasto energético al momento de moverse el tren*; este consume más energía eléctrica cuando se encuentra lleno de usuarios. No obstante, las líneas 1 y 2 del Siteur cuentan con un sistema de generación de energía eléctrica, a través de los vagones al momento del frenado; es decir, esta energía producida es inyectada nuevamente al sistema para ser aprovechada por el siguiente tren (Siteur, 2014). En suma, la utilización de esta tecnología ayuda a hacer eficiente el desplazamiento del sistema y la movilidad de los usuarios; sin embargo, *¿cómo lograr una mayor eficiencia?, o ¿qué factores deben ser considerados para lograr una mayor eficiencia del sistema?*

El planteamiento hipotético se centra en “la utilización de la piezoelectricidad como ecotecnología capaz de generar ahorros económicos y energéticos”. En este sentido, en función de la oferta y demanda energética en la línea 2 del tren ligero en las horas pico, se obtuvo el peso de los usuarios y la energía por persona que el sistema piezoeléctrico puede producir. Posteriormente, la información documental y los datos obtenidos en campo son trasladados al modelo entropía-homeostasis-negentropía (EHN), para establecer las condiciones homeostáticas del consumo energético del tren eléctrico en la metrópoli. Este modelo retoma los postulados de la segunda ley de la termodinámica y las consideraciones fundacionales de la teoría de sistemas, y logra, como lo muestra la [figura 1](#), una conceptualización que clasifica y califica cualitativamente el impacto antrópico. Los conceptos *entropía*, *homeostasis* y *negentropía* están constituidos por tres subfases cada uno: entropía subcrítica, entropía crítica, entropía hipercrítica, homeostasis reversible, homeostasis cuasirreversible, homeostasis irreversible, negentropía inexistente, negentropía ocasional y negentropía definitiva.



**Figura 1.** Estructura del modelo EHN

**Fuente:** González (2018).

## MÉTODO

Se realizó un estudio cualicuantitativo (Hernández, Fernández y Baptista, 2003), considerando la información vertida por el Siteur. Concretamente, datos referidos a la línea 2, desde la estación Juárez hasta la estación Tetlán, tal y como se muestra en la [figura 2](#). La justificación se basa en el hecho de que por esta línea se encuentran estaciones clave de afluencia poblacional indicadas en la [figura 3](#). Estos puntos son estratégicos geográfica, comercial y/o turísticamente. La estación Tetlán, el mercado San Juan de Dios y el centro histórico de Guadalajara son algunos ejemplos de nodos de importancia urbana. En este sentido, durante las denominadas horas pico, desde las 18:30 horas hasta las 20:20 horas se observó la frecuencia en el paso de los trenes, la cantidad promedio contable de usuarios que caben dentro de un carro de una unidad del tren eléctrico (dos carros/unidad), así como los costos económicos y gastos energéticos que presenta el sistema ante la CFE.

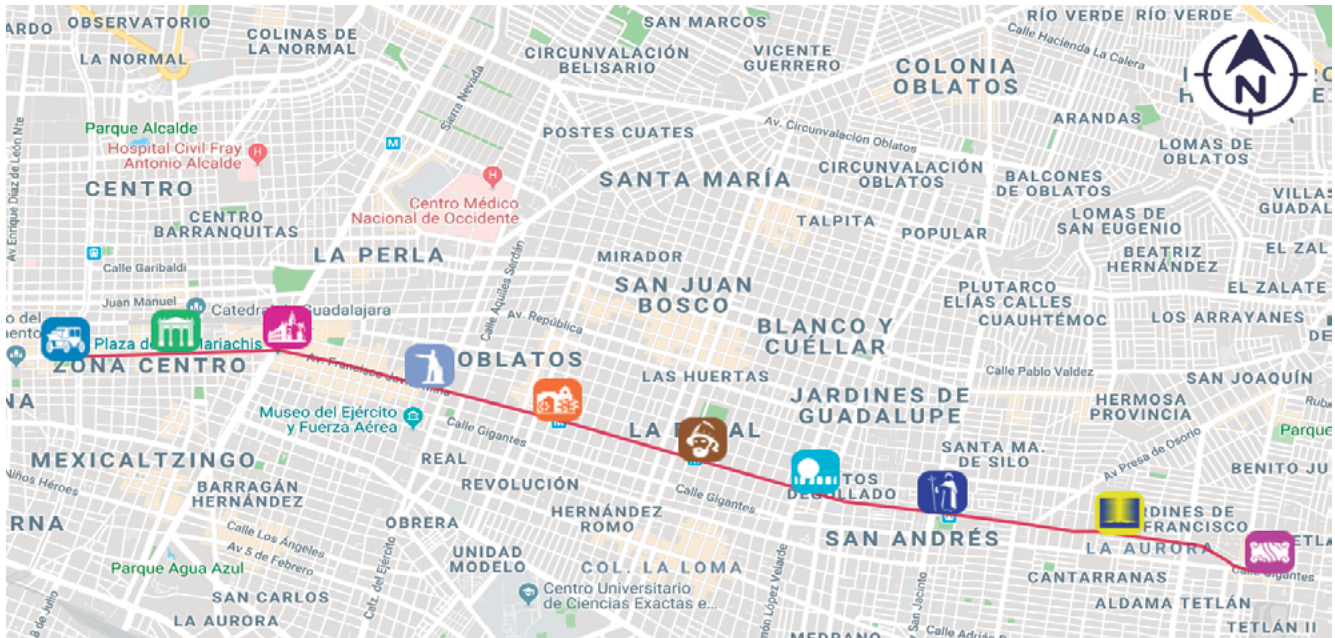


Figura 2. Línea 2 del Siteur (oriente-occidente)

Fuente: Siteur (2019).

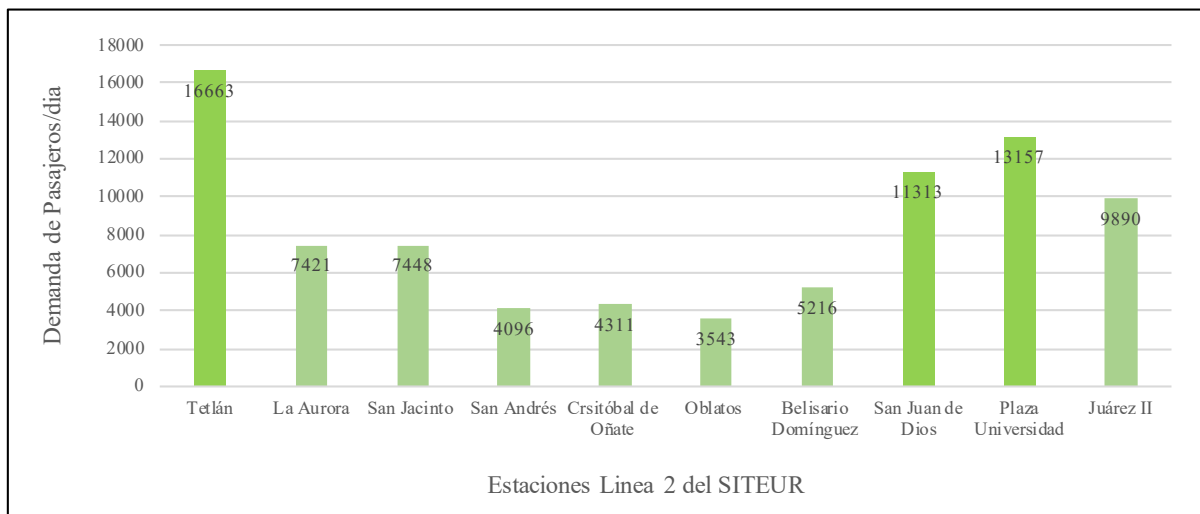


Figura 3. Afluencia en la línea 2 del Siteur

Fuente: ISA (2016).

Durante el tiempo que se estuvo observando la frecuencia de paso de los trenes en las horas pico, fue posible constatar que la línea 2 cuenta con dos modelos de trenes en operación y que han brindado el servicio por más de 20 años, los cuales para identificarlos se denominaron *carro 1* al modelo

TEG-88 y *carro 2* al modelo TEG-90. Asimismo, se revisaron datos proporcionados en 2017 por Siteur y la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se realizó, además, un estudio de campo a través de un conteo manual *in situ* para obtener una cantidad promedio de usuarios que entran a un carro del



tren ligero durante las horas de mayor demanda; es decir, se consideró el peso promedio total de personas dentro de un carro del tren ligero, que abordaron la línea 2 en estos horarios, y desde la estación Juárez (occidente) a la estación Tetlán (oriente). Este conteo permitió comparar el consumo de energía eléctrica al momento de mover las unidades, con respecto al porcentaje máximo de peso de los usuarios.

Aunado a lo anterior, se utilizaron datos del consumo eléctrico durante 2017, donde se identificó la cantidad de energía diaria, semanal y mensual que consume el tren ligero en su tracción para su movimiento y su servicio. Asimismo, tomando en cuenta los precios de las tarifas de alta tensión de la CFE considerando la demanda energética por región, sobre la distribución eléctrica que alimenta a las líneas del tren ligero. Para ello, se identificó un promedio estándar de la cantidad de personas que hacen uso del sistema desde a las 6:30 horas hasta las 20:20 horas en la línea 2 del Siteur; bajo el supuesto teórico de que el tren viaja con una cantidad constante de carga de extremo a extremo; además, se considera la utilización hipotética de sistemas piezoeléctricos para comparar los gastos del Siteur ante la CFE.

La investigación centró su estudio en la línea 2 del tren eléctrico, donde se observó la frecuencia

de paso de los trenes en las horas pico; desde las 18:40 horas hasta las 20:20 horas. En este sentido, se eligió como punto de partida la estación Juárez; una de las más importante del Siteur. Esta se ubica en la zona centro de la ciudad de Guadalajara y en horas pico cuenta con una gran cantidad de viajes desde las 16:30 hasta las 20:16 horas. Asimismo, se tuvieron 6 carros tipo TEG-90 y 4 carros tipo TEG-88, en donde fue considerada la cantidad de usuarios dentro de una unidad de tren ligero, mediante conteos realizados manualmente, para obtener una media total de en la unidad, tal y como se muestra en las [figuras 4 y 5](#).

Las observaciones y toma de mediciones mostradas en la [tabla 1](#) fueron realizadas el día martes 5 de diciembre de 2017, con el objetivo de corroborar la frecuencia de paso de los trenes en las horas pico (18:40 y 20:20 horas). En este sentido, en esta última hora se observó una considerable disminución la cantidad de usuarios que pretendían abordar el tren dentro de la estación Juárez en dirección a la estación Tetlán.

El cálculo del voltaje real que se puede producir con un sistema piezoeléctrico consideró los estándares establecidos por Academia de Ciencias de Morelos en México (2010), a través de las ecuaciones (1) a (3).



**Figura 4.** Contadores manuales utilizados en el ejercicio de campo

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 5.** Usuarios de pie, en un carro de la línea 2 del tren eléctrico de Guadalajara

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Observaciones *in situ* en la línea 2 del Siteur

Hora	Observaciones
18:30	Hora de llegada a la estación Juárez en dirección a la estación Tetlán sobre la línea 2; haciendo presencia en persona para observar el momento en el que se empieza a congestionar la estación de usuarios que pretenden abordar el tren durante ese periodo de tiempo, y así definir el inicio de la hora pico dentro de la estación.
18:44	Empieza a aglomerarse los usuarios en el andén de espera para abordar al tren.
18:46	Inicia la hora pico, ya que se pudo observar un incremento de hasta un 50 % adicional de usuarios que esperaban al tren. Se logra identificar esta situación, debido al total de personas que estaban esperando en el andén. Asimismo, solo el 50 % logra su abordaje.
18:50	A partir de este momento, los carros de los trenes que estaban en servicio empiezan a desplazarse totalmente llenos, de la estación Juárez con dirección a Tetlán en la línea 2.
19:30	En este periodo de tiempo, continúa llegando gran cantidad de usuarios que abordan y descienden dentro de la estación Juárez.
20:10	Ocurre una disminución gradual de usuarios que esperan en el andén para abordar a los carros del tren ligero hasta en un 50 %.
20:15	Concluye la hora pico en la estación Juárez con dirección a Tetlán en la línea 2. Durante el tiempo que se hizo presencia, se pudo observar que Siteur mantiene un patrón de movilización en sus unidades dentro de la línea 2, ya que hacían uso de sus dos modelos de trenes que se pueden identificar fácilmente, y los cuales intercambiaban conforme a los viajes.

**Fuente:** elaboración propia.

$$V = g33hT \quad (1)$$

$$F = mg \quad (2)$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde:

V = voltaje.

g33 = constante de voltaje del piezoeléctrico.

h = altura (grosor) del cerámico.

T = presión sobre el elemento.

F = fuerza.

m = masa.

g = aceleración de la gravedad.

P= presión.

F = fuerza.

A = área.



## RESULTADOS

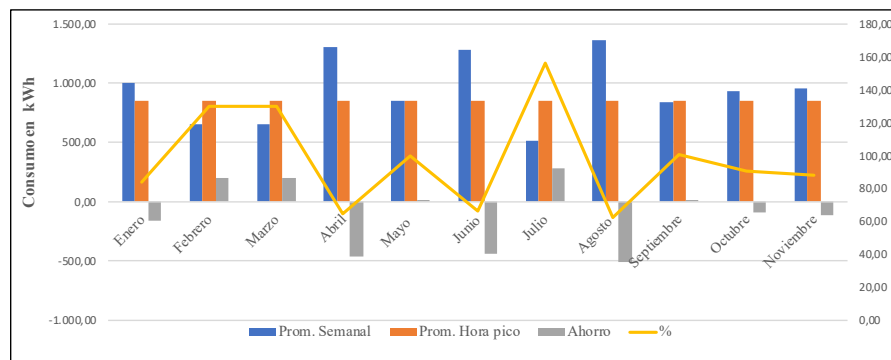
Se identificaron 6 trenes del modelo TEG-90 y 4 trenes del modelo TEG-88 operando en horas pico. De ahí, fueron contabilizados 27 viajes en un tiempo de 1,36 horas; considerando un tiempo de recorrido en 15 minutos y una distancia de 8,5 km. Asimismo, se obtuvo una cantidad aproximada de 235 usuarios a bordo. En este sentido, asumiendo un peso promedio del mexicano de 75 kg; entonces, la carga transportada oscila en los 17.625 kg por recorrido. No obstante, una unidad consta de dos carros y, suponiendo que ambos carros cargaran la misma cifra de usuarios en condiciones similares de masa corporal, se tendrían 35,25 toneladas por recorrido. De esta manera, para el cálculo del voltaje real se utilizó la ecuación (1), donde primeramente se obtuvo la fuerza de presión con la ecuación (2) y posteriormente la presión ejercida con la ecuación (3), sobre el área de los cristales piezoeléctricos (0,012 m<sup>2</sup>), el resultado corresponde a 61.312,5P

De acuerdo con el grosor del cerámico utilizado por la Academia de Ciencias de Morelos (ACMor), para sus discos piezoeléctricos, el valor correspondiente para este estudio es  $h = 0,14$  mm, o bien,  $h = 0,00014$  m. Por tanto, el voltaje real que se obtendría por el material piezoeléctrico de acuerdo con la ecuación (1) es de 17,168 V.

El voltaje anterior sería el total que se produciría con la constante de voltaje piezoeléctrica de los discos para una persona con un peso de 75 kg.

En este contexto, tomando la cantidad de 235 pasajeros contabilizados durante un viaje en las horas pico de las 18:30 y 20:20 horas se tiene dentro de un carro; es decir, media unidad de tren ligero un  $V_r = 17,1675$  V. Así pues, para 235 usuarios de 75 kg cada uno, se obtiene 4034,3 V (4,03 kV).

Por otro lado, en dos carros o una unidad completa del tren ligero, considerando que lleva la misma cantidad de usuarios y los mismos sistemas piezoeléctricos se tiene que para 470 usuarios del mismo peso se obtienen 8068,7 V (8,06 kW). Esta cantidad es suficiente para alimentar las tensiones reglamentarias, que oscilan entre los 0,75 kW, 1,0 kW y 3,0 kW. En este sentido, “una persona de 68 kg con un porcentaje de grasa corporal del 15 % equivale a una energía química acumulada de 348 MJ” (Starner y Paradiso, 2004). De tal forma que si esta persona realiza una frecuencia de 2 pasos/segundo puede llegar a generar un promedio de 67 W (Ibáñez, 2012); esto implica entonces, que 470 usuarios con un peso de 68 kg cada uno generarían 31.490,0 W (31,49 kW). Por tanto, considerando los 27 viajes contabilizados durante las horas pico vespertinas, con 470 usuarios del mismo peso, se tendría entonces, una capacidad de generación de energía de 850,23 kWh. Esta cantidad se encuentra relativamente cerca de la energía consumida en 2017 por el sistema (947,41 kWh). En suma, es posible lograr un ahorro considerable el cual se muestra en la [figura 6](#).



**Figura 6.** Ahorro promedio mensual en kWh Generación de energía en hora pico de enero-noviembre de 2017.

**Fuente:** elaboración propia.

Es preciso mencionar que los datos anteriormente mencionados son conservadores respecto al supuesto de que solo una unidad del servicio de tren ligero haga su recorrido con los datos límite de usuarios y su peso.

## CONCLUSIÓN

Las energías renovables están tomando el papel principal de generación de energía en todo el mundo, ya que se considera de gran necesidad mundial el ser más eficientes y sustentables como sociedad.

Actualmente, grandes empresas han optado por implementar fuentes renovables de energía, con la finalidad de contrarrestar el impacto ambiental producido por la forma de habitar y moverse en la ciudad. En este contexto, el Siteur ha demostrado las ventajas de la innovación tecnológica y el uso de fuentes de energía no dependientes de los recursos fósiles. Recientemente, ha sustituido los rehiltes en cada una de sus estaciones, por unos automatizados donde se utiliza una tarjeta de prepago (InnovaCard) para poder acceder al ingreso de las estaciones y utilizar el servicio. Este nuevo mecanismo se implementó a partir de abril de 2018, con la finalidad de crear y facilitar la movilidad de los usuarios. Sin embargo, la gran afluencia que tienen las estaciones durante las horas pico origina entropía o energía no utilizada para producir trabajo. De esta manera, en estos horarios,

es posible aprovechar la aglomeración de usuarios para generar energía que permita alimentar al sistema, el cual se indica en la [tabla 2](#).

Ciertamente, el uso de la tecnología piezoeléctrica en áreas de movilidad viene cobrando gran importancia e interés en el mundo, ya que facilita la generación de energía a través de sistemas que favorecen la mitigación del impacto ambiental ocasionado por el alto consumo energético. Esta tecnología tiene una gran versatilidad en su implementación, toda vez, que puede ser instalada dentro de cada unidad del tren, en pasillos o escaleras y aprovechar el peso de cada usuario.

Un sistema piezoeléctrico en condiciones óptimas de generación puede generar una eficiencia de hasta el 89,7 % en comparación con el promedio semanal de consumo de kW del Siteur sobre la línea 2; esto debido a la gran afluencia que en promedio ronda los 83.059 usuarios diarios en horas pico. Por tanto, es posible generar energía eléctrica a través de estos sistemas y la entropía originada por la conglomeración y afluencia de usuarios en el Siteur; posteriormente, esta energía puede ser almacenada o inyectada en las líneas de la red para la tracción y funcionamiento del tren. Este escenario implicaría considerables ahorros económicos, eficiencia y beneficios diversos para la empresa (Siteur), convirtiéndose en un sistema de transporte sustentable, al generar y operar con fuentes alternas de energía.

**Tabla 2.** Aplicación del modelo EHN a la línea 2 del Siteur

Entropía	Homeostasis	Negentropía
Conglomeración y afluencia de usuarios dentro de los carros del tren ligero y estaciones del Siteur durante la hora pico.	Uso de recursos renovables para la generación de energía.	Gasto en el consumo de energía, debido a la alta demanda del servicio en especial en horas pico y días festivos.
Secuencia de paso de los carros del tren ligero durante las horas pico.	Aprovechamiento de la afluencia y conglomeración con el peso de los usuarios para la generación de energía con tecnología piezoeléctrica.	Pago de impuestos por parte del Siteur, por el uso de la energía para brindar el servicio, debido a la dependencia de los servicios de la CFE para el suministro de energía.
Gasto y consumo energético por los servicios del Siteur.	Interacción de la tecnología piezoeléctrica para la generación de energía con la secuencia de paso de trenes en las vías.	Gasto y consumo energético por los servicios de Siteur.

**Fuente:** elaboración propia.

## REFERENCIAS

- Academia de Ciencias de Morelos (ACMor) (2010). *Pisando y generando piezoelectricidad*. Recuperado de: <http://acmor.org.mx/cuamweb/reportescongreso/2010/fisico-mate/110-%20CUM-%20Pisando%20y%20Generando.pdf>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2017). *Esquemas Tarifarios*. Recuperado de: [https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas\\_negocio.asp](https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_negocio.asp)
- Faure, R. (2004). *La tracción eléctrica en la alta velocidad ferroviaria (A.V.F.)*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. doi: <https://doi.org/10.3989/ic.1969.v22.i210.3718>
- García, F., González, M. y Asprilla, Y. (2018). Determinación de los componentes entrópicos de la accidentalidad: el trinomio vehículo/usuario/camino en la metrópoli de Guadalajara, México. *Tecnura*, 22(55), 51-65. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.13245>
- González, M. (2016). Infraestructura y desarrollo: las afectaciones del comercio adyacente a la línea 3 del tren ligero en Jalisco. *Tecnogestión*, 1(13), 24-34. doi: <https://doi.org/10.5821/ace.12.36.4848>
- González, M. (2018). Entropy and negentropy of the particular electric vehicle in urban systems: homeostasis of mobility in Mexico. *DYNA*, 85(206), 171-177. doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.72509>
- De Quevedo, F., Asprilla, Y. y González, M. (2017). Entropías de la movilidad urbana en el espacio metropolitano de Guadalajara: transporte privado y calidad del aire. *Tecnura*, 21(53), 138-149. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.10725>
- Hernández, R., Fernández C. y Baptista, P. (2003). *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill Interamericana.
- Ibáñez, J. (2012). *Diseño de un prototipo para la generación energética mediante tecnología piezoeléctrica. Aplicación a escaleras*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/14982/1b%C3%A1%20Ib%C3%A1ez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto de Información Estadística y Geografía del Estado de Jalisco (IIEG) (2017). *Estudio de población y sociedad. Información sociodemográfica urbana*. Jalisco. doi: <https://doi.org/10.2307/j.ctvg5bs7s.9>
- ISA Corporativo (2016). *Presentación de datos estadísticos de afluencia en SITEUR*. Recuperado de [http://isa.com.mx/pdf/PRESENTACION\\_SITEUR.pdf](http://isa.com.mx/pdf/PRESENTACION_SITEUR.pdf).
- Mapa Metro (2010). *Tren Eléctrico de Guadalajara*. doi: <https://doi.org/10.14482/sun.30.3.7101>
- Sistema de Transporte Colectivo (2007). *Operación. Cifras operacionales*. Recuperado de: <http://www.metro.df.gob.mx>.
- Siteur (2014). *Innovación y Tecnología de los Trenes*. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.i2.194>
- Siteur (2019). *Línea 2*. Recuperado de <http://www.siteur.gob.mx/tren-ligero/linea-2.html>
- Starner, T. y Paradiso, J.A. (2004). Human Generated Power for Mobile Electronics. En C. Piguet (ed.), *Low-Power Electronics Design* (pp. 1–35). CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420039559.ch45>





## Desarrollo y fabricación de un microsensor de gas de baja potencia para la detección de amoníaco a bajas concentraciones

### Development and manufacture of a low power gas microsensor for the detection of ammonia at low concentrations

Daniel Rodríguez<sup>1</sup>, Juan Bonaparte<sup>2</sup>, Norberto Boggio<sup>3</sup>, Alejandro Fasciszewski<sup>4</sup>

**Fecha de recepción:** 3 de octubre de 2018

**Fecha de aceptación:** 15 de marzo de 2019

**Cómo citar:** Rodríguez, D., Bonaparte, J., Boggio, N.G. y Fasciszewski, A. (2019). Desarrollo y fabricación de un microsensor de gas de baja potencia para la detección de amoníaco a bajas concentraciones. *Tecnura*, 23(61), 23-30. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.15353>

#### Resumen

**Contexto:** En este trabajo se presenta el desarrollo y microfabricación de un sensor de gas cuyo funcionamiento se basa en las variaciones de su conductividad eléctrica en presencia de determinados gases. Para utilizar estos sensores en equipos portátiles, como monitores de gases, se requiere que la potencia utilizada para mantener la película sensible a la temperatura de funcionamiento sea muy baja. Los resultados de este desarrollo permiten contar además con una plataforma para la microfabricación de sensores de gas, sobre la que se pueda incorporar diversos tipos de películas sensoras.

**Metodología:** El microsensor desarrollado está constituido por una película delgada de SnO<sub>2</sub> depositada sobre un sustrato de silicio micromaquinado. El diseño propuesto se realizó mediante simulaciones de los comportamientos mecánico y térmico. El procedimiento incluyó operaciones de microfabricación.

Posteriormente se realizó la caracterización eléctrica y se ensayó la sensibilidad frente a amoníaco gaseoso.

**Resultados:** La microfabricación se llevó a cabo de forma satisfactoria (no se detallan todos los pasos en el presente trabajo), y se logró una alta tasa de sensores bien conformados por oblea. La caracterización del sensor frente a diferentes concentraciones de amoníaco gaseoso en aire dio como resultado una respuesta lineal para concentraciones entre 6 ppm a 50 ppm, donde este último es el límite permisible de exposición.

**Conclusiones:** Se desarrolló un proceso para fabricar un microsensor de gas de SnO<sub>2</sub> de bajo consumo (50 mW). Se llevó a cabo la fabricación de los microsensores de manera satisfactoria, partiendo de simulaciones previas. En relación a trabajos futuros, la plataforma micromaquinada desarrollada, con el calefactor incorporado, permitirá utilizar distintas películas sensoras.

- 1 Licenciado en Física, doctor en Ciencia y Tecnología mención Física, investigador Departamento de Micro y Nanotecnología, Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina. Contacto: [drodri@tandar.cnea.gov.ar](mailto:drodri@tandar.cnea.gov.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6828-4132>
- 2 Ingeniero electrónico, Departamento de Micro y Nanotecnología, jefe de división Micro y Nanofabricación, Departamento de Micro y Nanotecnología, Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina. Contacto: [bonaparte@cnea.gov.ar](mailto:bonaparte@cnea.gov.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7209-6441>
- 3 Licenciado en Química, doctor en Ingeniería de Microsistemas, investigador del Instituto de Nanociencia y Nanotecnología (INN-Conicet). Buenos Aires, Argentina. Contacto: [boggio@cnea.gov.ar](mailto:boggio@cnea.gov.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5421-5598>
- 4 Magister en Ingeniería Electrónica, ingeniero electrónico, director del Departamento de Micro y Nanotecnología, Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina. Contacto: [afascisz@cnea.gov.ar](mailto:afascisz@cnea.gov.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3704-3066>

**Palabras clave:** sensor de gas, películas delgadas, monitoreo ambiental.

## ABSTRACT

**Objective:** This paper presents the development and manufacture of a gas microsensar whose operation is based on variations in electrical conductivity in the presence of certain gases. To use these sensors in portable equipment such as gas monitors, the power used to keep the film sensitive to the operating temperature is required to be very low. The results of this development provide with a platform for the manufacture of gas microsensors that allow different types of sensor films can be incorporated.

**Methodology:** The developed microsensar consists of a thin film of SnO<sub>2</sub> deposited on a micro-machined silicon substrate. The proposed design was carried out by simulations of mechanical and thermal behavior. The procedure included microfabrication

operations, and then, the electrical characterization was performed and the sensitivity to gaseous ammonia was tested.

**Results:** Microfabrication was carried out satisfactorily (although this work does not detail all the steps of the process), and a high rate of well-formed sensors per sheet was achieved. The behavior of the sensor in the presence of different concentrations of gaseous ammonia in air was characterized and resulted in a linear response for concentrations between 6 ppm to 50 ppm, and the latter is the permissible limit of exposure.

**Conclusions:** A low consumption (50 mW) SnO<sub>2</sub> gas microsensar was successfully developed based on previous simulations. In relation to future work, the developed micromachined platform with the built-in heater will allow the use of different sensor films.

**Keywords:** *gas sensor, thin films, environmental monitoring.*

## INTRODUCCIÓN

Los sensores de gas desempeñan un papel vital entre las aplicaciones tecnológicas más importantes en la cotidianidad actual. Los usos típicos de sensores de gas incluyen la detección de compuestos tóxicos y gases explosivos con fines de seguridad pública y doméstica, procesos industriales, el monitoreo de la contaminación ambiental y, más recientemente, en el diagnóstico de enfermedades de diverso tipo, la identificación del grado de maduración de frutos comestibles o la detección de pestes en los cultivos (Dey, 2018 ; Korotcenkov y Cho, 2017; Miller, Akbar y Morris, 2014; Mirzaei, Leonardi y Neri, 2016; Lamagna *et al.*, 2008; Vorobioff *et al.*, 2018).

Entre los diversos tipos de sensores de gas, los resistivos son los más atractivos debido a la facilidad de fabricación, operación simple, bajo costo de producción y miniaturización (Barsan, Koziej y Weimar, 2007; Korotcenkov, 2007; Franke, Koplín y Simon, 2006; Acosta Pérez, Suárez Castrillón y

Suárez Castrillón, 2016). Un sensor de gas resistivo típico contiene una película de detección activa, cuya conductividad es altamente sensible a las sustancias presentes en los ambientes circundantes. El primer dispositivo comercial de sensor de gas fue desarrollado en la década de 1960 utilizando óxido de metal como la capa de detección (Ihokura *et al.*, 1994).

Desde entonces, la investigación en esta materia tuvo como objetivos mejorar la sensibilidad, la selectividad, la velocidad (respuesta y tasa de recuperación) y la estabilidad del sensor. El desarrollo en sensores de gas logró un progreso significativo impulsado por la nanociencia y la nanotecnología emergentes (Xu *et al.*, 2018; Zhang, Liu, Neri y Pina, 2016; Hoa, Duy, El-Safty y Hieu, 2015). Por otra parte, las crecientes necesidades de dispositivos pequeños requieren de la miniaturización de los sistemas de análisis. Esta ofrece beneficios no solamente económicos (la fabricación en serie cuesta menos), sino también la reducción de tamaños de muestra para análisis, portabilidad y consumo de reactivos.



La sensibilidad del sensor ( $S$ ), definida como  $R_g/R_a$  ó  $R_g/R_a - \text{donde } R_a \text{ y } R_g \text{ son resistencia eléctrica en aire y gas, respectivamente}$ -, puede ser altamente dependiente del tamaño de grano ( $D$ ) del óxido metálico, cuando el tamaño del grano es comparable a  $2L$  -donde  $L$  es el espesor de la región de vaciamiento de electrones-. Cuando  $D$  es mucho mayor que  $2L$ , solo el borde de grano está sujeto a la formación de la región de vaciamiento de electrones, lo que significa que el efecto de detección en superficie no afecta mucho a la resistencia del sensor ( $R$ ). Para  $D \leq 2L$ , la mayor parte del grano o todo el grano se agota de electrones. En este caso, la resistencia del sensor es muy sensible para la detección, resultando así que la sensibilidad es altamente dependiente del tamaño del grano (Yamazoe, 1991). Junto con el tamaño de partícula, otras características microestructurales de los semiconductores de óxidos metálicos, como la morfología y la porosidad, también tienen influencia sobre la sensibilidad y la velocidad de respuesta del sensor, debido al ordenamiento de los átomos en ciertas caras del cristal, el aumento del área superficial y una mejor difusión del gas (Wagner *et al.*, 2013; Lee, 2009).

Otro requerimiento importante de los sensores de gas es el funcionamiento de forma altamente precisa y selectiva con el fin de satisfacer las demandas de aplicaciones versátiles. Hasta el momento, se han desarrollado numerosas estrategias para mejorar la selectividad del sensor para un determinado gas, entre las que se cuentan la fabricación de nanocompuestos, la funcionalización de la superficie, el diseño de heteroestructuras (Vargas, 2018; Kaushik *et al.*, 2015; Miller, Akbar y Morris, 2014; Alenez, Henley, Emerson y Silva, 2014) la utilización de zeolitas, etc.

Las características del sensado se relacionan con las reacciones, térmicamente activadas, entre las especies a ser detectadas, las partículas de la película sensora y las adsorbidas previamente. Estas reacciones conducen a una variación de la conductividad de la película, conducida al exterior por contactos y conductores eléctricos. Para

optimizar la respuesta del dispositivo, en general se prefiere operar la película sensora a una temperatura controlada y uniforme elevada, normalmente de varios cientos de grados centígrados. A fin de mantener el consumo eléctrico dentro de niveles aceptables ( $<100$  mW), es usual ubicar o integrar los calefactores y películas sensoras sobre una plataforma aislada térmicamente del sustrato portante del dispositivo.

En el presente trabajo se describe el desarrollo de un proceso de microfabricación para obtener un sensor de gas de película delgada con reducido consumo de potencia eléctrica.

## METODOLOGÍA

El sensor propuesto se basa en una plataforma calefactora micromaquinada térmicamente aislada, dentro de la cual se integran los microcalefactores y los contactos eléctricos sobre los cuales descansa la película sensora. La plataforma se realizó mediante una película dieléctrica suspendida, sobre la cual se depositaron las termorresistencias que componen el calefactor y los contactos eléctricos de la película sensora. La suspensión de toda la estructura ofrece la aislación térmica necesaria.

El microsensar de gas que se desarrolló está constituido por una película delgada de  $\text{SnO}_2$  depositada sobre un sustrato de silicio micromaquinado. Esta película se encuentra calefaccionada térmicamente por un microcalefactor integrado en el microsensar para obtener una temperatura comprendida entre  $200^\circ\text{C}$  y  $400^\circ\text{C}$ .

### Diseño y proceso de microfabricación propuesto

Para el diseño del sensor se tuvieron en cuenta dos aspectos: lograr la mayor cantidad de sensores por oblea de silicio y que el proceso de microfabricación tuviera el menor número de pasos posibles.

Para analizar el diseño propuesto (figura 1) se realizaron dos tipos de simulaciones:

- Mecánica: rigidez estructural, tamaños máximos y mínimos de estructuras suspendidas. Análisis de sensibilidad a las variaciones de los parámetros.
- Térmica: distribución de temperaturas y potencias eléctricas involucradas.

El proceso de fabricación está constituido por doce pasos que abarcan desde el depósito de la fotorresina hasta el encapsulado de los sensores individuales.

La totalidad de la estructura propuesta se pudo realizar con el equipamiento y personal disponible en la sala limpia del Departamento de Micro y Nanotecnología, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, Argentina.

## RESULTADOS

El proceso de microfabricación se llevó adelante de forma satisfactoria (no se detallan todos los pasos

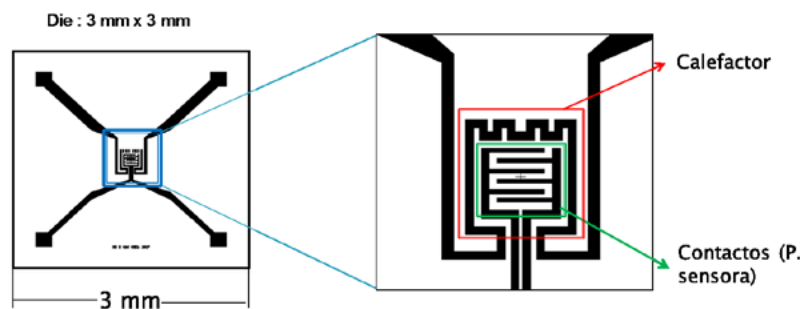
en el presente trabajo), logrando una alta tasa de sensores bien conformados por oblea (figura 2, a y b).

Posteriormente se cortó la oblea para obtener los sensores individuales (*dicing*). Esta etapa constituyó uno de los pasos críticos, dado que se produce una alta tasa de ruptura de las películas suspendidas.

Los sensores individuales bien conformados luego del *dicing* fueron montados en encapsulados (figura 3).

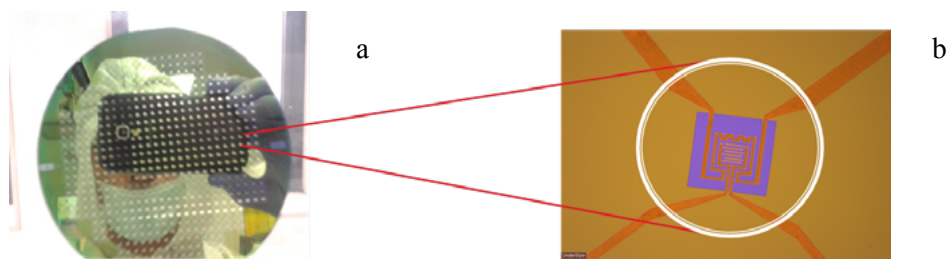
## Caracterización eléctrica

Se realizó la caracterización eléctrica de los sensores utilizando una estación de prueba (figura 4) que permite medir los sensores individuales antes de realizar el encapsulado. En esta etapa se estudió la respuesta del calefactor midiendo la resistencia eléctrica frente a valores de tensión aplicada entre 0,1V y 5V.



**Figura 1.** Esquema del sensor propuesto. En la ampliación de la parte central del sensor se puede observar el detalle del diseño.

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** a) Oblea de silicio maquinada, b) fotografía de un sensor individual

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación se presentan una serie de mediciones para determinar la temperatura del sensor según la tensión aplicada al calefactor, sobre un sensor en particular:

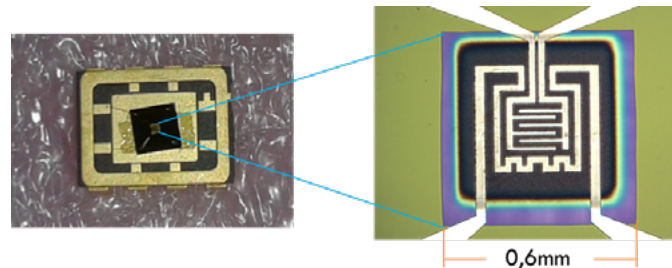
De esta manera se puede regular el calentamiento de la película sensora al variar la tensión aplicada al calefactor.

Simultáneamente, durante las mediciones, en el microscopio se registraron las modificaciones superficiales que se producen durante el calentamiento al aplicarse las diferentes tensiones. La película sensora se encuentra suspendida sobre una membrana de nitruro de silicio (en color violáceo en las fotos), cuyo espesor es de alrededor de 250 nm. Los cambios observados hacia una tonalidad más oscura al aumentar la tensión eléctrica, corresponden a deformaciones mecánicas de la membrana como resultado del calentamiento local, respecto de la periferia, más fría (figura 5).

**Tabla 1.** Valores de temperatura obtenidos de acuerdo con la tensión aplicada

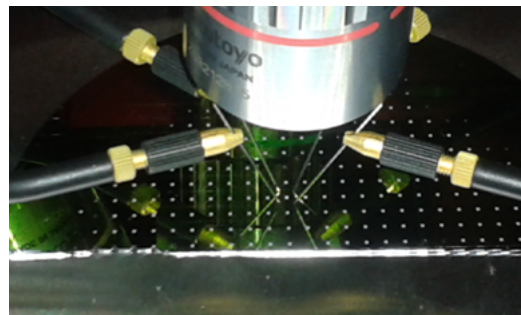
Tensión [voltios]	Resistencia [W]	Temperatura [oC]
0,1	324	25 (T ambiente )
1,0	342	30
1,5	361	45
2,0	382	62
2,5	404	81
3,0	427	101
3,5	450	123
4,0	472	143
4,5	494	158
5,0	516	180

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 3.** Sensor individual montado sobre un encapsulado

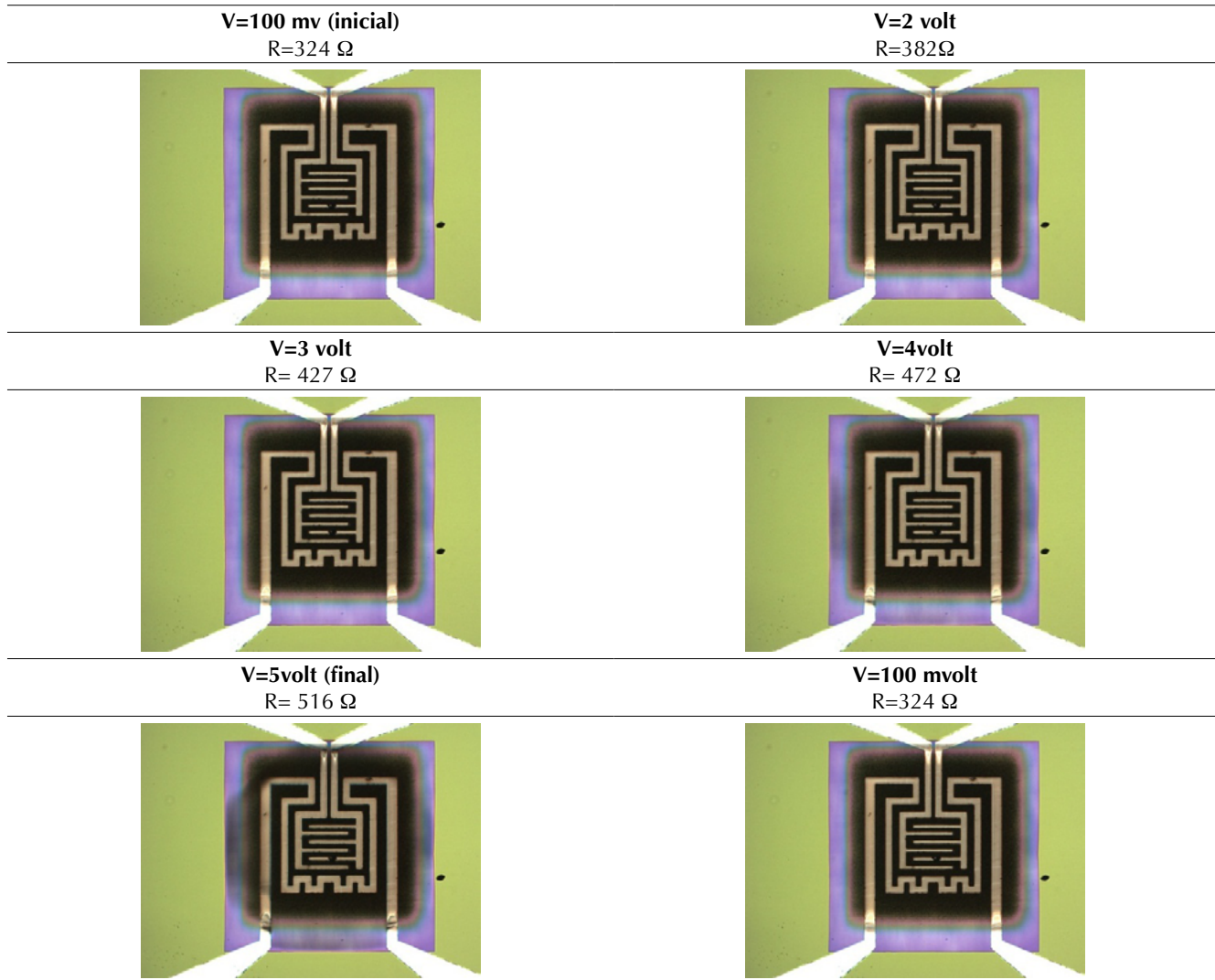
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 4.** Se observan las puntas de prueba de la estación de prueba sobre los contactos eléctricos del microcalefactor y de la película sensible.

**Fuente:** elaboración propia.





**Figura 5.** Secuencia del calentamiento de la película sensora

Nota: se observan los cambios superficiales en función de la tensión aplicada.

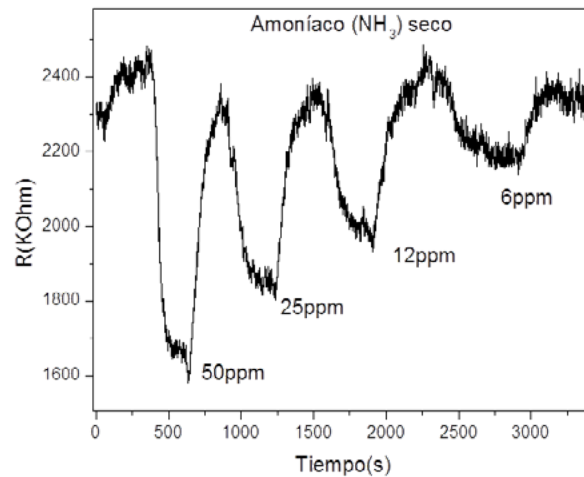
**Fuente:** elaboración propia

### Caracterización frente a gases

Luego de ser encapsulados, se llevó a cabo la caracterización de los sensores, para lo cual se evaluó su respuesta en un banco de gases. Para ello se colocó cada sensor dentro de una cámara con un volumen aproximado de 75 cm<sup>3</sup>. Como gas portador, se inyectó aire sintético a un caudal controlado de 80 cm<sup>3</sup>/min que a su vez constituye la línea de base.

A continuación se presentan los resultados correspondientes a un sensor ya encapsulado. Las

mediciones fueron realizadas aplicando una tensión de 5 V al calefactor, obteniendo potencia disipada entre 44 y 49 mW. La temperatura de operación de la película sensora en estas condiciones es de 180 °C aproximadamente. Por otra parte la película sensora está conectada a un potencial 1 V. Se mide entonces la respuesta del sensor como la variación de la resistencia eléctrica en función del tiempo de respuesta. Los resultados se presentan en la [figura 6](#).



**Figura 6.** Respuesta del sensor vs. Tiempo de respuesta para diversas concentraciones de amoníaco gaseoso.

Nota: el límite de detección se estableció en 6 ppm.

**Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un proceso para fabricar un microsensador de gas de  $\text{SnO}_2$  con un consumo del orden de 50 mW.

De acuerdo con los objetivos propuestos, se llevó a cabo la fabricación de los microsensadores de manera satisfactoria. Dentro de los pasos de fabricación la etapa crítica a mejorar es la de corte de la oblea en *dices* (sensores individuales), dada la alta tasa de ruptura de las membranas suspendidas.

En relación a trabajos futuros, la plataforma micromaquinada, con el calefactor incorporado, permite utilizar distintas películas sensoras, lo que ofrece una amplia variedad de aplicaciones, a requerimiento de instituciones públicas o privadas.

## REFERENCIAS

- Acosta Pérez, M.A., Suárez Castrillón, S.A. y Suárez Castrillón, A.M. (2016) Desarrollo y ensayo de un sensor químico de fibra óptica para la medición de concentraciones de dióxido de carbono. *Tecnura*, 20(50), 29-42. doi: [http:// 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a02](http://10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a02)
- Alenezi, M.R., Henley, S.J., Emerson, N.G. y Silva, S.R. (2014). *Nanoscale*, 6(1), 235-247.
- Barsan, N., Koziej, D. y Weimar, U. (2007). Metal oxide-based gas sensor research: How to? *Sens. & Actuators B*, 121(1), 18-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.09.047>
- Dey A. (2018). Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science & Engineering B*, 229, 206-217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.036>
- Franke, M.E., Koplín T.J. y Simon, U. (2006). Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors. Does the nanoscale matter? *Small*, 2, 36-50. doi: <https://doi.org/10.1002/smll.200500261>
- Hoa, N.D., Duy, N.V., El-Safty, S.A. y Hieu, N.V. (2015). Meso-/Nanoporous Semiconducting Metal Oxides for Gas Sensor Applications. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-12. doi: <https://doi.org/10.1155/2015/972025>
- Ihokura, K. y Watson, J. (1994). *The Stannic Oxide Gas Sensor Principles and Applications*. Boca Raton, FL, EE. UU.: CRC Press.
- Kaushik, A., Kumar, R., Arya, S.K., Nair, M., Malhotra, B. y Bhansali, S. (2015). Organic-Inorganic hybrid nanocomposite based gas sensors for environmental

- monitoring. *Chemical Reviews*, 115(11), 4571-4606. doi: <https://doi.org/10.1021/cr400659h>
- Korotcenkov G., (2007) Metal oxides for solid state gas sensors: what determines our choice? *Materials Science Engineering B*, 139(1), 1–23. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.01.044>
- Korotcenkov, G. y Cho, B.K. (2017). Metal oxide composites in conductometric gas sensors: Achievements and challenges. *Sensors and Actuators B*, 244, 182-210. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2016.12.117>
- Lamagna, A., Reich, S., Rodríguez, D., Boselli, A. y Cicerone, D. (2008) . The use of an electronic nose to characterize emissions from a highly polluted river. *Sensors & Actuators B*, 131(1), 121-124. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.026>
- Lee, J.H. (2009). Gas sensors using hierarchical and hollow oxide nanostructures: Overview. *Sensors And Actuators B*, 140(1), 319-336. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.04.026>
- Miller, D.R., Akbar, S.A. y Morris, P.A. (2014). Nanoscale metal oxide-based heterojunctions for gas sensing: A review. *Sensors & Actuators B*, 204, 250-272. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2014.07.074>
- Mirzaei, A., Leonardi, S.G. y Neri, G. (2016). Detection of hazardous volatile organic compounds (VOCs) by metal oxide nanostructures-based gas sensors: A review. *Ceramics International* 42, 15119–15141. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.145>
- Vargas, A.M.N. y Jaramillo, I. (2018). La industria de sensores en Colombia. *Tecnura*, 22(57), 44-54. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.13518>
- Vorobioff, J., Adaro, M., Boggio, N., Magallanes, J., Boselli, A., Lamagna, A. y Rinaldi, C. (2018). *Sensor Letters*, 16(6), 410-414. doi: <https://doi.org/10.1166/sl.2018.3973>
- Wagner, T., Haffer, S., Weinberger, C., Klaus, D. y Tiemann, M. (2013). Mesoporous materials as gas sensors. *Chemical Society Reviews*, 42, 4036-4053. doi: 10.1039/C2CS35379B
- Xu, K., Fu, C., Gao, Z., Wei, F., Ying, Y., Xu, C. y Fu, G. (2017). Nanomaterial-based gas sensors: A review. *Instrumentation Science & Technology*, 46(2), 115-145. doi: 10.1080/10739149.2017.1340896
- Yamazoe, N. (1991). New approaches for improving semiconductor gas sensors. *Sensors & Actuators B*, 5, 7-19. doi: [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(91\)80213-4](https://doi.org/10.1016/0925-4005(91)80213-4)
- Zhang, J., Liu, X., Neri, G. y Pinna, N. (2016). Nanostructured Materials for Room- Temperature Gas Sensors. *Advanced Materials*, 28, 795-831. doi:10.1002/adma.201503825





## Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo

### Construction and evaluation of a high voltage divider for lightning impulse tests

Juan David Mina-Casaran<sup>1</sup>, Diego Fernando García<sup>2</sup>, Diego Fernando Echeverry<sup>3</sup>

**Fecha de recepción:** 5 de febrero de 2019

**Fecha de aceptación:** 15 de mayo de 2019

**Cómo citar:** Mina-Casaran, J.D., García, D.F. y Echeverry, D.F. (2019). Construcción y evaluación de un divisor de alto voltaje para pruebas de impulso tipo rayo. *Tecnura*, 23(61), 23(61), 31-44. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.14385>

#### Resumen

**Contexto:** La medición segura y efectiva de señales de alto voltaje se ha convertido, desde hace años, en una de las mayores preocupaciones por parte de quienes realizan ensayos en alta tensión. En ese sentido, el divisor de tensión representa uno de los dispositivos de mayor importancia para la medición en laboratorio de señales como las generadas por los rayos. Sin embargo, el divisor debe contar con características adecuadas de voltaje nominal, factor de escala y respuesta en frecuencia, para que la señal registrada sea un reflejo de la señal aplicada al equipo bajo prueba. Muestra de ello son los tipos más comunes de divisores de tensión desarrollados (divisor resistivo, divisor capacitivo y divisor capacitivo amortiguado), cada uno con características propias que permiten un buen desempeño del sistema de medición y registro en alta tensión. Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de medición y registro, en lo referente a la etapa de conversión, en este trabajo se presentan los aspectos teóricos y prácticos relacionados con el diseño, construcción y

evaluación de un divisor capacitivo amortiguado de 300 kV, usado para la medición de señales de impulso de tensión tipo rayo.

**Método:** Para el diseño y evaluación del divisor de voltaje, se utilizaron herramientas computacionales de simulación, como *Mathematica*® y *Pspice*®, las cuales ayudaron a estimar el comportamiento de los componentes del divisor: resistor de amortiguamiento y ramas de bajo voltaje. Del mismo modo, se utilizaron equipos de laboratorio (medidor de respuesta en frecuencia y generador de impulsos de voltaje de 300 kV), para verificar el desempeño de los componentes del divisor. Los ensayos se basaron en pruebas de respuesta en frecuencia, capacidad de aislamiento y obtención de los factores de escala del divisor, de acuerdo con estándares internacionales.

**Resultados:** En la prueba de respuesta en frecuencia realizada al resistor de amortiguamiento, desde 20 Hz hasta aproximadamente 1 MHz, los efectos parásitos son despreciables y la impedancia del resistor se puede considerar puramente resistiva. Por

- 1 Ingeniero electricista, magíster en Ingeniería Eléctrica. Estudiante de Doctorado en Ingeniería del Grupo de Investigación en Alta Tensión (Gralta), Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: [juan.mina@correounivalle.edu.co](mailto:juan.mina@correounivalle.edu.co) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9670-6897>
- 2 Ingeniero electricista, magíster de Generación de Energía Eléctrica, doctor en Ingeniería. Docente del Grupo de Investigación en Alta Tensión (Gralta), Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: [diego.garcia@correounivalle.edu.co](mailto:diego.garcia@correounivalle.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1055-1415>
- 3 Ingeniero electricista, doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle. Docente del Grupo de Investigación en Alta Tensión (Gralta), Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: [diego.echeverry@correounivalle.edu.co](mailto:diego.echeverry@correounivalle.edu.co) ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6067-2955>

su parte, en la prueba de capacidad de aislamiento, se observó que el resistor puede soportar impulsos de tensión de hasta 10 kV, sin que se produzca ruptura del aislamiento del resistor. Respecto a la verificación de los factores de escala, las diferencias porcentuales no superaron el límite de variación de voltaje pico establecido por norma.

**Conclusiones:** Los resultados muestran que la metodología desarrollada fue adecuada para el diseño, construcción y simulación del divisor de tensión. Los modelos eléctricos propuestos en la metodología fueron suficientes para obtener resultados confiables en las simulaciones. Finalmente, las contribuciones más importantes del trabajo fueron la construcción de un resistor de amortiguamiento no inductivo y la construcción de una rama adicional de bajo voltaje.

**Palabras clave:** divisor de voltaje, factor de escala, impulso de tensión, rama de bajo voltaje, resistor de amortiguamiento.

### Abstract

**Context:** For years, the safe and effective measurement of high voltage signals has one of the major concerns of those conducting high voltage tests; in these cases, voltage divider represents one of the most important devices for laboratory measurement of signals (such as those generated by lightning). However, the divider must have adequate characteristics of nominal voltage, scale factor, and frequency response, so that the recorded signal is a reflection of the signal applied to the equipment under test. For example, the most commonly developed voltage dividers (resistive divider, capacitive divider, and damped capacitive divider) have their own characteristics that allow a good performance of the high voltage measurement and recording system. This paper

presents the theoretical and practical aspects related to design, construction, and evaluation of a damped capacitive divider of 300 kV in order to evaluate the performance of the measurement and recording system in relation to the conversion stage.

**Method:** Simulation tools such as MATHEMATICA® and PSPICE® were used for the design and evaluation of the voltage divider. These helped estimate the behavior of the divider components (damping resistor and low voltage arms). Additionally, laboratory equipment (frequency response meter and 300 kV voltage pulse generator) was used to verify the performance of the components. The experiments were based on frequency response tests, insulation capacity, and obtaining the scale factors according to national and international standards.

**Results:** In the frequency response test performed on the damping resistor from 20 Hz to 1 MHz, the parasitic effects are negligible and the impedance of the resistor can be considered purely resistive. In the insulation capacity test, resistor can withstand voltage pulses of up to 10 kV without breaking the resistor insulation. Regarding the verification of the scale factors, the percentage differences did not exceed the limit of peak voltage variation set by the standard.

**Conclusions:** The results show the methodology developed was adequate for the design, construction, and simulation of the voltage divider. The electrical models suggested in the methodology were sufficient to obtain reliable results during simulations. Finally, the most important contributions of this work were the construction of a non-inductive damping resistor and the construction of an additional low-voltage branch.

**Keywords:** damping resistor, lightning impulse voltage, low voltage branch, scaling factor, voltage divider.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de medición para ensayos de alta tensión en laboratorio incorporan dispositivos de conversión, transmisión y registro de datos. Una de las

partes más importantes del proceso, la tiene el dispositivo de conversión, conocido como *divisor de tensión*, el cual reduce la amplitud del voltaje a un valor adecuado y seguro para los dispositivos de medición y registro (Pattarakijkul, Kurupakorn y

Charoensook, 2010). Los divisores de tensión han sido ampliamente utilizados en diversas aplicaciones con el propósito de garantizar procesos de medición seguros de señales de alto voltaje (Daum y Lynch, 1989; Kovačević, Brajović, Stanković y Osmokrović, 2016; Ortiz, Jiménez y Ramos, 2014). En los ensayos de impulso de tensión tipo rayo, existen dos dificultades relacionadas con la medición de la señal (García, Saens, Prado y Martínez, 2009): i) la gran amplitud de dichas señales, que se encuentra en el orden de kilovoltios hasta megavoltios, y ii) sus pendientes de variación rápida, las cuales están dentro del rango de décimas de microsegundos. Por estas razones, el divisor debe contar con valores adecuados de voltaje nominal, factor de escala y respuesta en frecuencia, para que la señal registrada sea un reflejo de la señal aplicada al equipo bajo prueba.

Los divisores de tensión empleados para medición de señales de impulso pueden clasificarse en tres tipos según los elementos pasivos usados y la configuración de las ramas de alto y bajo voltaje (Kuffel, Zaengl y Kuffel, 2000; Passon, Gitin y Meisner, 2016; Teachawong y Trakulkan, 2014; Yan, Zhao y Li, 2018): resistivos, capacitivos y capacitivos amortiguados.

En su estructura, un divisor resistivo tiene dos ramas resistivas conectadas en serie. Este tipo de divisor se caracteriza por presentar un excelente tiempo de respuesta. Sin embargo, cuando la resistencia total es alta, el divisor presenta una característica de transferencia desfavorable y cuando la resistencia total es baja, se afecta la forma de la señal aplicada. Con respecto al factor de escala, este parámetro es dependiente de la frecuencia de la señal dada la presencia de capacitancias parásitas.

Los divisores capacitivos están conformados por dos ramas capacitivas y representan una mejora respecto a los divisores resistivos, ya que eliminan la dependencia del factor de escala con la frecuencia (Kuffel, Zaengl y Kuffel, 2000; García *et al.*, 2009; Prochazka, Hlavacek, Knenicky y Mahmoud, 2016). La ubicación del divisor en el recinto de pruebas y la impedancia del instrumento

de medida que queda en paralelo con la capacitancia de la rama de bajo voltaje del divisor provocan oscilaciones y variaciones en la señal de salida, lo cual dificulta su medida. Los divisores capacitivos amortiguados reducen dichas oscilaciones mediante la incorporación de resistores de amortiguamiento en las ramas de alto o bajo voltaje. No obstante, este tipo de divisor para impulso sigue presentando algunas dificultades relacionadas con inductancias parásitas, capacitancias parásitas y capacitancias distribuidas (Kuffel, Zaengl y Kuffel, 2000). Las inductancias parásitas surgen por las conexiones entre los elementos pasivos que conforman las ramas de alto y bajo voltaje, causando oscilaciones en el frente de la señal medida y retardo del tiempo de respuesta del divisor. Las capacitancias parásitas obedecen a la disposición y geometría resultante de los elementos que conforman las ramas de alto y bajo voltaje del divisor. Dichas capacitancias atenúan la señal medida, lo que dificulta su registro en los dispositivos utilizados para tal fin. Por su parte, en el momento de la aplicación del impulso, entre el borne de entrada de la señal y tierra aparece una capacitancia distribuida que provoca grandes esfuerzos eléctricos entre los elementos pasivos que constituyen la rama superior del divisor (Teachawong y Trakulkan, 2014). En la práctica solo puede ser parcialmente compensada con la instalación de electrodos relajadores de campo eléctrico (Pattanadech, Potivetkul y Yuttagowith, 2006).

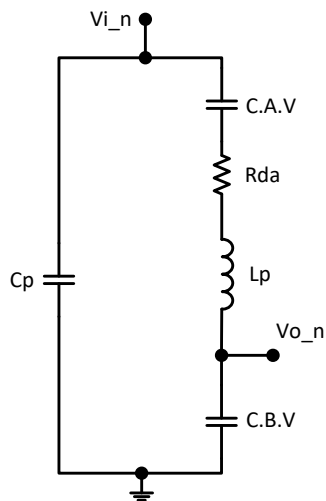
En este artículo se presenta una metodología con los requerimientos necesarios para el diseño, construcción y evaluación de un divisor de tensión capacitivo amortiguado (DCA) de 300 kV, utilizado para medición de señales de impulso tipo rayo (1,2/50  $\mu$ s, según norma) (Alfonso, Perdomo, Santamaria y Gómez, 2014; García y Rincón, 2009). El artículo está dividido de la siguiente forma: inicialmente se presenta el DCA de 300 kV previo, utilizado como insumo y del cual se identificaron posibles mejoras en algunos de sus componentes. Luego se muestra la metodología utilizada y sus etapas. Posteriormente, se exponen los resultados



de los ensayos realizados con base en procedimientos descritos en estándares internacionales IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013) e IEC High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems (2010). Por último, se presentan las conclusiones principales del trabajo.

## DIVISOR DE TENSIÓN CAPACITIVO AMORTIGUADO PARA IMPULSO

El modelo eléctrico simplificado de un divisor de tensión capacitivo amortiguado, se muestra en la figura 1. Este se compone de dos ramas capacitivas de alto y bajo voltaje ( $C_{A.V}$ ,  $C_{B.V}$ ) conectadas en serie con una resistencia de amortiguamiento ( $R_{da}$ ) y una inductancia parásita ( $L_p$ ). El modelo también incluye una capacitancia parásita ( $C_p$ ). Los valores  $V_{i_n}$  y  $V_{o_n}$  representan los voltajes de entrada y salida del divisor.



**Figura 1.** Modelo eléctrico simplificado del DCA

**Fuente:** elaboración propia.

Por otra parte, para que el divisor pueda medir adecuadamente las señales de impulso, debe cumplir con los requerimientos eléctricos descritos a continuación:

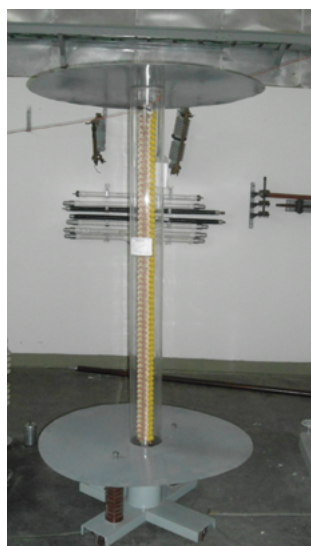
- *Voltaje nominal y voltaje máximo.* Son el valor nominal para el cual ha sido previsto el funcionamiento del divisor, y el voltaje máximo que puede alcanzar el divisor sin que represente un riesgo en su operación.
- *Factor de escala.* Es la relación entre las tensiones nominales de entrada y salida del divisor. Del modelo eléctrico simplificado presentado anteriormente, al despreciar los efectos parásitos se obtiene el factor de escala ( $a$ ), tal como se muestra en la ecuación (1):

$$a = \frac{V_{i_n}}{V_{o_n}} = \frac{C_{B.V} \cdot (1 + R_{da} \cdot C_{A.V})}{C_{A.V}} \quad (1)$$

- *Cargabilidad.* Para que el divisor de tensión no influya de manera significativa en la forma de la señal aplicada, su capacitancia total debe ser como mínimo 10 veces menor a la capacitancia del generador de impulso.
- *Tiempo de respuesta.* Hace referencia al comportamiento dinámico del divisor de tensión ante una entrada tipo escalón unitario.
- *Ancho de banda.* Indica la máxima frecuencia que el divisor puede tolerar sin que se produzcan recortes en la señal medida. Para que no existan recortes en el frente de la señal medida, el ancho de banda del divisor debe ser mayor a 1,2 MHz.
- *Distribución lineal del campo eléctrico.* Las capacitancias parásitas provocan grandes esfuerzos eléctricos entre los condensadores de la rama superior del divisor. Dichos esfuerzos se reducen en la práctica con la instalación de electrodos relajadores de campo eléctrico.

### Aspectos generales del DCA de 300 kV

El prototipo de DCA de 300 kV se muestra en la figura 2. El divisor es utilizado para pruebas de impulso de tensión tipo rayo en el Laboratorio de Alta Tensión (LAT) de la Universidad del Valle.



**Figura 2.** Divisor de tensión capacitivo amortiguado del LAT

**Fuente:** Laboratorio de Alta Tensión. Universidad del Valle.

Se compone por las ramas de alto y bajo voltaje, electrodos relajadores de campo eléctrico, tubo soporte (cuerpo del divisor) y plataforma para su movilidad (Vera y Prado, 2006). La rama de alto voltaje posee 125 condensadores de  $0,1 \mu\text{F}$  y  $3 \text{ kV}$  cada uno, conectados en serie a un resistor de amortiguamiento  $R_{da}$ . La rama inferior cuenta con una capacitancia equivalente de  $0,68 \mu\text{F}$ . El resistor se compone de un cilindro de policloruro de vinilo (PVC) el cual aloja una solución líquida de sal y agua destilada. Por otra parte, para reducir los esfuerzos eléctricos entre los condensadores de la rama superior, el divisor emplea electrodos relajadores de campo eléctrico de placas paralelas.

Las especificaciones técnicas del divisor se muestran en la [tabla 1](#) (Vera y Prado, 2006).

A continuación, se presentan las desventajas técnicas sobre el prototipo de DCA de  $300 \text{ kV}$ , las cuales dificultan su desempeño:

- *Resistor de amortiguamiento líquido.* Este tipo de resistor permite obtener diferentes valores de resistencia dependiendo de la cantidad de sal en el líquido, pero presenta desventajas como el

**Tabla 1.** Especificaciones técnicas del DCA de  $300 \text{ kV}$  inicial

Voltaje de entrada nominal	$300 \text{ kV}$
Voltaje de entrada máximo	$375 \text{ kV}$
Voltaje de salida nominal	$353 \text{ V}$
Factor de escala	$850:1$
Capacitancia de alto voltaje	$800 \text{ pF}$
Capacitancia de bajo voltaje	$0,68 \mu\text{F}$
Resistencia de amortiguamiento	$475 \Omega$
Capacitancia parásita	$43 \text{ pF}$
Inductancia parásita	$35 \mu\text{H}$
Ancho de banda	$929 \text{ kHz}$
Altura	$2,2 \text{ m}$
Diámetro ext. de las placas (relajador de campo)	$1 \text{ m}$

**Fuente:** elaboración propia.

mantenimiento continuo que se debe realizar a la solución para garantizar el valor de resistencia. Por otra parte, dado el tipo de conducción presente en el resistor (por ionización), no existe un modelo definido que ayude a reducir los efectos inductivos presentes a altas frecuencias los cuales causan oscilaciones en el frente de la señal medida.

- *Rama de baja tensión.* El divisor cuenta con un factor de escala de  $850:1$ , adecuado para impulsos de tensión entre  $100 \text{ kV}$  y  $300 \text{ kV}$ , pero para tensiones menores a  $100 \text{ kV}$  (utilizadas normalmente en el LAT) se presentan problemas de ruido a la salida del divisor.
- *Cuerpo del divisor de tensión.* Se compone de un tubo de acrílico el cual presenta un espacio inadecuado para alojar el resistor de amortiguamiento.

### Propuestas de mejora sobre el prototipo de DCA de $300 \text{ kV}$

Para dar solución a los problemas mencionados, en este trabajo se propuso:



- Mitigar las oscilaciones que se presentan a la salida del divisor por medio de la construcción de un resistor de baja inductancia a base de alambre de níquel y cromo.
- Adicionar una rama de bajo voltaje con factor de escala menor a 850:1 que garantice una mayor exactitud en la medición de señales menores a 100 kV, sin influencia de ruido.
- Cambiar el cuerpo del divisor con el propósito de darle mayor rigidez mecánica y proporcionar el espacio adecuado para alojar el resistor de amortiguamiento.

## METODOLOGÍA DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL DCA

La metodología propuesta para el diseño, construcción y evaluación del DCA de 300 kV requiere el desarrollo de tres etapas las cuales se presentan a continuación (figura 3).

### Identificación de parámetros previos de diseño

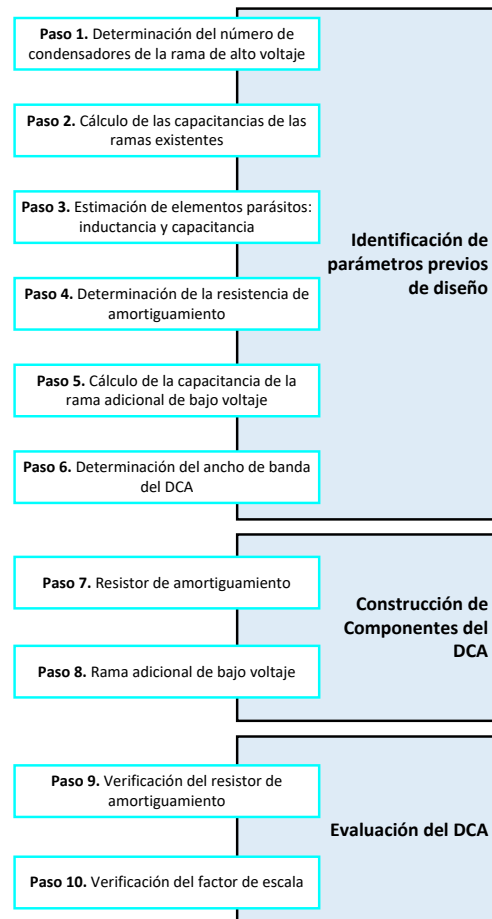
En esta etapa se presenta el cálculo de los parámetros de diseño del DCA de 300 kV para medición de ondas de impulso de 1,2/50  $\mu$ s.

#### Determinación del número de condensadores de la rama de alto voltaje

El número mínimo de condensadores de la rama de alto voltaje ( $n_{min}$ ) se determina a partir de la ecuación (2):

$$n_{min} = \frac{V_{max}}{V_{nc}} \quad (2)$$

Donde,  $V_{max}$  y  $V_{nc}$  son los voltajes máximo y nominal del divisor y para cada condensador, respectivamente.



**Figura 3.** Metodología para el diseño, construcción y evaluación de un DCA de 300 kV

**Fuente:** elaboración propia.

#### Cálculo de las capacitancias de las ramas existentes

Las capacitancias  $C_{A.V}$  y  $C_{B.V}$  se determinan de acuerdo con las ecuaciones (3) y (4):

$$C_{A.V} = \frac{C_{A.V-i}}{n} \quad (3)$$

$$C_{B.V} = \frac{C_{A.V}}{a} \quad (4)$$

Donde,  $C.A.B_i$  es la capacitancia del condensador  $i$ , igual para todos los condensadores,  $n$  representa el número total de condensadores conectados en serie en la rama de alto voltaje, y  $a$  es el factor de escala del divisor.

**Estimación de elementos parásitos: inductancia y capacitancia**

Para el cálculo de la capacitancia parásita, se puede utilizar la ecuación descrita en la ecuación (5) y propuesta en Kuffel, Zaengl y Kuffel (2000).

$$C_p = 2\pi\epsilon_0 \frac{l_1 + l_2 + l_3}{3}, [F] \tag{5}$$

Donde,  $l_1$ ,  $l_2$  y  $l_3$  son la altura, largo y ancho del divisor. El parámetro  $\epsilon_0$  constituye la permitividad del aire.

**Determinación de la resistencia de amortiguamiento**

Según Kuffel, Zaengl y Kuffel (2000), el valor de la resistencia de amortiguamiento debe ser entre dos y cuatro veces el valor de impedancia característica del divisor. El rango de variación de  $R_{da}$  se muestra en la ecuación (6).

$$2\sqrt{\frac{L_p}{C_{AV} + C_p}} \leq R_{da} \leq 4\sqrt{\frac{L_p}{C_{AV} + C_p}} \tag{6}$$

Para encontrar el valor adecuado de  $R_{da}$  es necesario simular el comportamiento del divisor de tensión empleando el modelo equivalente de la figura 1. El análisis se inicia utilizando el valor mínimo de resistencia y se modifica dentro del rango estipulado, hasta obtener una señal de salida correspondiente a la señal de impulso aplicada.

**Cálculo de la capacitancia de la rama adicional de bajo voltaje**

Para determinar la capacitancia equivalente de la rama adicional de bajo voltaje se utiliza la

ecuación (1), y se consideran los siguientes parámetros de diseño:

- 50 % de la tensión nominal del divisor.
- Factor de escala: (413:1).
- Voltaje de salida del divisor:  $V_{i\_n/a}$ .
- Capacitancia de la rama de alta tensión: C.A.V.
- Resistencia de amortiguamiento:  $R_{da}$ .

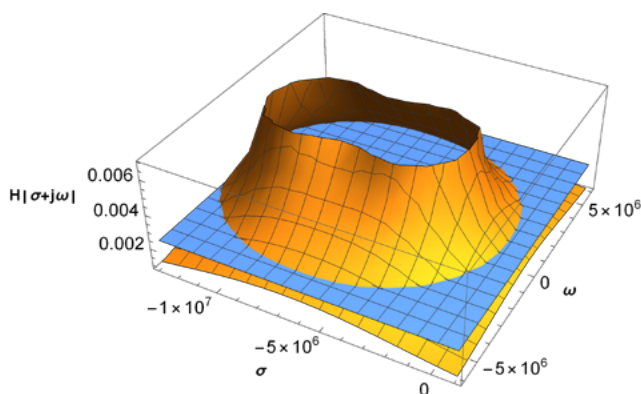
**Determinación del ancho de banda del DCA**

Para determinar el ancho de banda del divisor, se emplea la herramienta computacional *Mathematica*®, y se obtienen las curvas de ganancias del divisor en función de las frecuencias  $\omega$  (radianes) y  $\sigma$  (nepers), a partir de su función de transferencia mostrada en la ecuación (7).

$$H(s) = \frac{V_{o\_n}}{V_{i\_n}} = \frac{k_0}{k_1s^2 + k_2s + k_3} \tag{7}$$

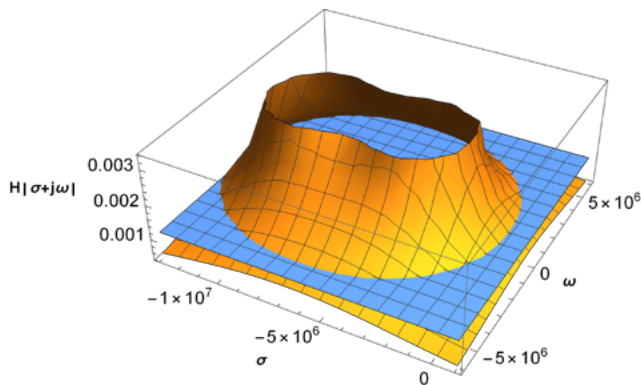
Donde,  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  son constantes que dependen de los valores de los elementos pasivos del divisor. El DCA cuenta con funciones de transferencia  $H1(s)$  y  $H2(s)$  dados los factores  $a_1$  (413:1) y  $a_2$  (850:1).

Las superficies de ganancia del divisor para cada factor de escala, interceptan los planos 1/413 (figura 4) y 1/850 (figura 5).



**Figura 4.** Intersección del plano de ganancia 1/413 del divisor y su superficie de respuesta en frecuencia  $H1(s)$

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 5.** Intersección del plano de ganancia 1/850 del divisor y su superficie de respuesta en frecuencia  $H2(s)$

**Fuente:** elaboración propia.

Los puntos extremos de la intersección de las dos superficies corresponden a las frecuencias de corte  $\omega$  y  $\sigma$ . Por su parte, la [figura 6](#) muestra la proyección de las intersecciones de los planos 1/413 y 1/850 con las superficies de respuesta en frecuencia  $H1(s)$  y  $H2(s)$ , vistas desde los ejes  $\omega$  y  $\sigma$ , y que además delimitan el ancho de banda del DCA. Las frecuencias neperianas  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  representan los límites máximos de frecuencias del divisor. En ese sentido, el ancho de banda  $AB$  se calcula como se presenta en la ecuación (8):

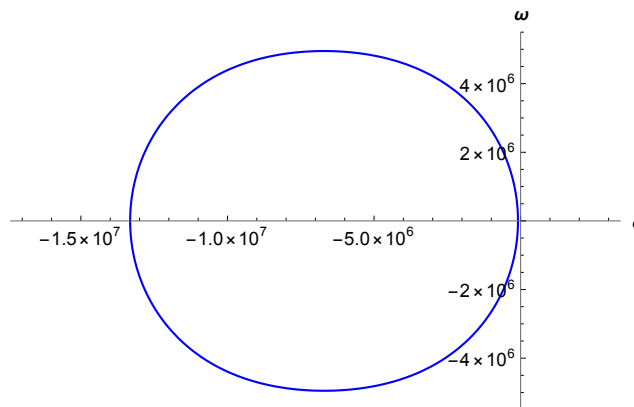
$$AB = \sigma_1 - \sigma_2 \tag{8}$$

### Construcción de componentes del DCA

En esta etapa se presenta el proceso de construcción de los componentes que se diseñaron para lograr un mejor desempeño del DCA.

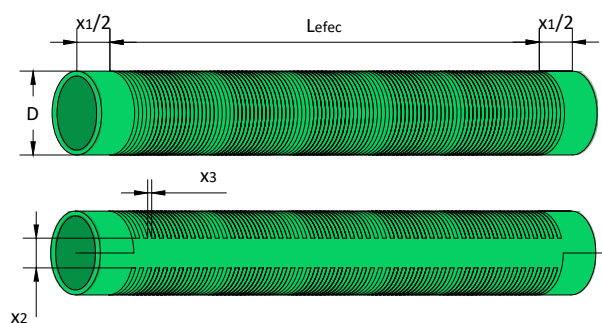
#### Resistor de amortiguamiento

El resistor fue diseñado para valores transitorios de voltaje y corriente de 10 kV y 29 A, los cuales se obtuvieron al simular el sistema de generación y medición de un impulso de tensión de 300 kV por medio de la herramienta computacional *Pspice*® (Mina, 2013). Para la construcción del resistor se empleó un alambre de níquel y cromo. La técnica aplicada consistió en arrollar en forma de vai-vén, el alambre alrededor de un cilindro de PVC ([figura 7](#)), con el objeto de minimizar los campos magnéticos en toda la longitud del resistor, cuando por el alambre circulara una corriente determinada. Este tipo de construcción se consigue sin necesidad de reducir la potencia y rendimiento del resistor y solo requiere la mitad del alambre que emplearía una configuración del tipo Ayrton-Perry (Pan *et al.*, 2015).



**Figura 6.** Proyección de las intersecciones de las ganancias del divisor con las superficies de respuesta en frecuencia  $H1(s)$  y  $H2(s)$  (vista superior)

**Fuente:** elaboración propia.



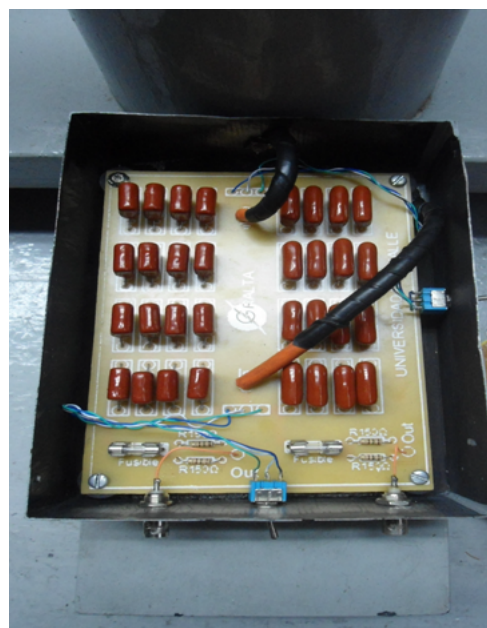
**Figura 7.** Disposición del alambre a lo largo del tubo de PVC

**Fuente:** elaboración propia.

El resistor fue alojado dentro de otro cilindro de PVC que posteriormente se llenó de aceite dieléctrico con el propósito de darle mayor capacidad de aislamiento. En la [tabla 2](#) se presentan las especificaciones técnicas del resistor de amortiguamiento final.

#### Rama de bajo voltaje adicional

En la [figura 8](#) se observan las ramas de bajo voltaje del divisor. Cada una cuenta con un arreglo serie-paralelo de 16 condensadores con capacitancia equivalente 0,33  $\mu\text{F}$  y 0,68  $\mu\text{F}$  respectivamente.



**Figura 8.** Ramas de baja tensión del divisor

**Fuente:** Laboratorio de Alta Tensión. Universidad del Valle.

Cada condensador soporta una tensión máxima de 400 V (1600 V por rama de baja tensión). Los resistores  $R1a$  y  $R1b$  (75  $\Omega$  cada uno) se utilizan para mitigar el efecto de onda viajera de la señal de impulso que se genera en el cable coaxial conectado entre el divisor y el osciloscopio.

**Tabla 2.** Especificaciones técnicas del resistor de amortiguamiento final

Resistencia por unidad de longitud	$R_{al}$	34,8 $\Omega/\text{m}$
Longitud del alambre	$L_{al}$	13,7 m
Longitud del tubo soporte del alambre	$L$	0,3 m
Espacio de seguridad	$x_1$	0,04 m
Longitud efectiva del tubo	$L_{efec} = L - x_1$	0,26 m
Diámetro del tubo	$D$	0,05 m
Perímetro del tubo	$P$	0,16 m
Separación entre principio y final de cada espira	$x_2$	0,018 m
Perímetro efectivo del tubo	$P_{efec} = P - x_2$	0,142 m
Número de espiras	$E = L_{al} / P_{efec}$	97
Separación entre espiras	$x_3 = L_{efec} / E$	0,0026 m
Voltaje de cada espira	$V_{esp} = 10 \text{ kV} / E$	103 V
Voltaje entre espiras	$V_{e-e} = 2 \cdot V_{esp}$	206 V
Resistencia esperada	$R = E \cdot P_{efec} \cdot R_{al}$	479 $\Omega$

**Fuente:** elaboración propia.

## Evaluación del DCA

La evaluación del divisor consistió en: i) verificación del funcionamiento del resistor de amortiguamiento a través de pruebas de respuesta en frecuencia y capacidad de aislamiento, y ii) verificación de los factores de escala del divisor de acuerdo con los procedimientos descritos en IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013) y en IEC High-Voltage Test Techniques (2010).

### Verificación del funcionamiento del resistor de amortiguamiento

El resistor de amortiguamiento fue evaluado mediante pruebas experimentales en el LAT. Se realizaron ensayos de respuesta en frecuencia, para determinar posibles efectos parásitos en el resistor a altas frecuencias. Por medio de la ecuación (9) se calcula la inductancia parásita para un determinado valor de frecuencia  $\omega$ .  $X_{Rda}$  es la reactancia del resistor para el valor de frecuencia dado.

$$L_{Rda} = \frac{X_{Rda}}{\omega} \quad (9)$$

Para verificar la capacidad de aislamiento del resistor, fueron aplicados entre sus terminales diversos impulsos de 10 kV. Para ello se utilizó un generador de impulsos de voltaje (GIV) de 300 kV y un divisor de tensión resistivo relación 1000:1.

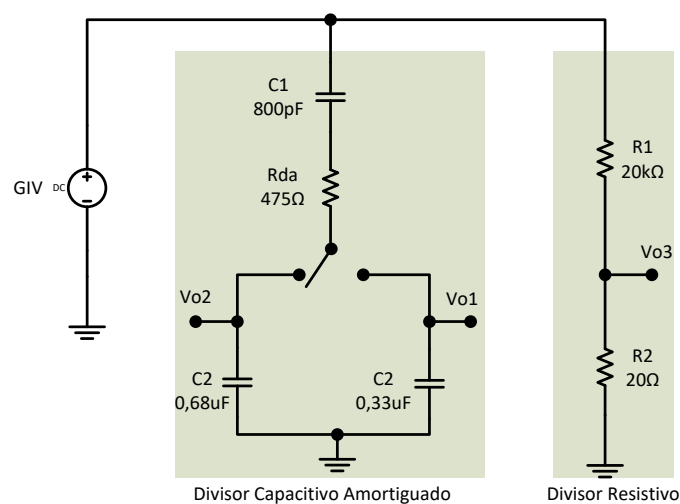
### Verificación de los factores de escala del DCA

Se realiza de acuerdo con lo establecido en la norma IEC 60060-2. El diagrama esquemático de la prueba se muestra en la figura 9. Para cada rama de baja tensión del divisor se aplicaron 24 impulsos de  $1,2/50 \mu s$  y magnitud entre 30 kV y 300 kV. Cada factor de escala experimental se calculó a partir de la ecuación (10).

$$n_i = \frac{V_{o3\_i} \cdot 1000}{V_{\alpha\_i}} \quad (10)$$

Donde,  $V_{o3\_i}$  representa el dato  $i$  de la señal de salida del divisor resistivo,  $V_{\alpha\_i}$  es el dato  $i$  de la señal de salida del DCA:  $x=1$  para el factor de escala  $a1$ ,  $x=2$  para el factor de escala  $a2$ .

Para verificar la validez de los factores de escala obtenidos experimentalmente, la norma IEC 60060-2 establece un margen máximo de



**Figura 9.** Esquema de prueba para la evaluación del DCA

**Fuente:** elaboración propia.

diferencia de  $\pm 3\%$  entre los voltajes máximos de las señales de impulso del divisor bajo prueba y el divisor utilizado como patrón o referencia. Por medio de la ecuación (11) se realiza el cálculo de la diferencia porcentual, donde  $V_{1_i}$  y  $V_{3_i}$  son los voltajes de entrada para el ensayo  $i$  de los divisores capacitivo amortiguado y resistivo.

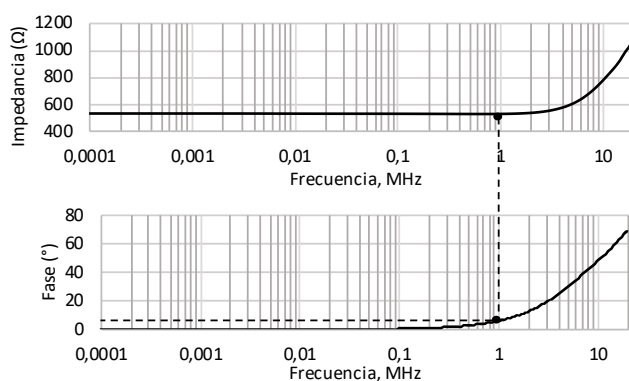
$$dif_{\%_i} = \left| \frac{V_{3_i} - V_{1_i}}{V_{3_i}} \right| \cdot 100 \quad (11)$$

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas al DCA para comprobar su funcionamiento.

### Respuesta en frecuencia del resistor RDA

En la [figura 10](#) se observa el comportamiento de la impedancia y el ángulo de fase con relación a la frecuencia en el resistor de amortiguamiento. Desde 20 Hz hasta aproximadamente 1 MHz los efectos



**Figura 10.** Gráfica de respuesta en frecuencia del resistor de amortiguamiento

**Fuente:** elaboración propia.

parásitos son despreciables y la impedancia del resistor se puede considerar puramente resistiva.

A partir de la ecuación (9), se calculó la inductancia parásita presente en el resistor a 1,04 MHz. La impedancia del resistor y su inductancia parásita, para el valor de frecuencia dado, equivalen a:

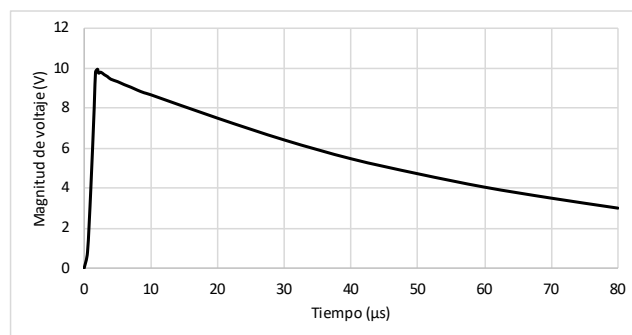
$$Z = (481 + j54) \Omega, L_p = 8,3 \mu H$$

### Capacidad de aislamiento del resistor RDA

Los resultados obtenidos de los impulsos aplicados sobre el resistor de amortiguamiento ([figura 11](#)) indican una buena capacidad de aislamiento. El resistor puede soportar impulsos de tensión de hasta 10 kV, sin que se produzcan fallas en toda su estructura.

### Verificación de los factores de escala del DCA

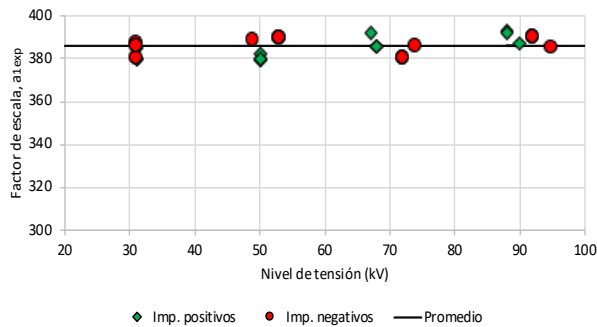
El comportamiento estadístico de los factores de escala calculados experimentalmente a partir de la ecuación (10), se muestran en las [figuras 12](#) y [13](#), respectivamente.



**Figura 11.** Señal de salida para la evaluación de la capacidad de aislamiento del resistor: impulso de 10 kV

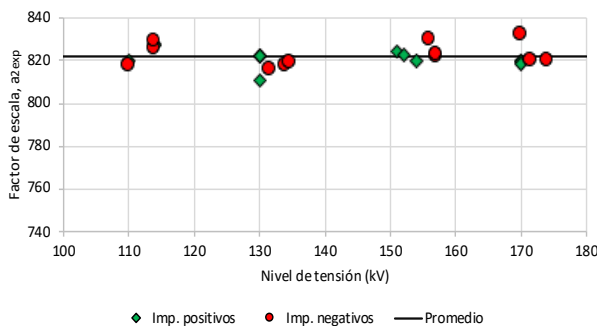
**Fuente:** elaboración propia.





**Figura 12.** Gráfico de factor de escala rama #1 vs. nivel de tensión

Fuente: elaboración propia.



**Figura 13.** Gráfico de factor de escala rama #2 vs. nivel de tensión

Fuente: elaboración propia.

Para verificar la validez de los factores de escala experimentales, se tomaron como referencia dos ensayos realizados en donde se aplicaron impulsos de 50 kV y 170 kV. En las tablas 3 y 4 se detallan los resultados.

**Tabla 3.** Datos para verificación del factor de escala-rama #1.

Parámetros	Divisor resistivo	DCA
Voltaje de salida	50 V	132 V
Factor de escala	1000:1	386:1
Voltaje de entrada	50.000 V	50.952 V

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Datos para verificación del factor de escala-rama #2.

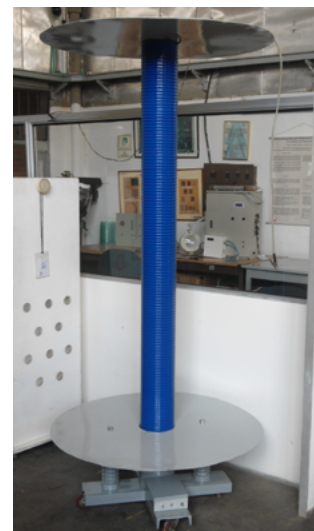
Parámetros	Divisor resistivo	DCA
Voltaje de salida	170 V	204 V
Factor de escala	1000:1	822:1
Voltaje de entrada	170.000 V	167.688 V

Fuente: elaboración propia.

Por medio de la ecuación (11) se calculan las diferencias porcentuales entre los voltajes máximos de las señales de impulso de los divisores resistivo y capacitivo amortiguado:

- Ensayo 1 ( $a_{1exp}=386:1$ ):  $dif\%_1=2\%$ .
- Ensayo 2 ( $a_{2exp}=822:1$ ):  $dif\%_2=1\%$ .

Las diferencias porcentuales para los dos ensayos tomados como muestra, no superan el límite de variación de voltaje pico establecido por norma  $\pm 3\%$ , de esta forma, para el análisis realizado experimentalmente, los factores de escala experimentales son válidos. La versión final del DCA de 300 kV y sus especificaciones técnicas, se muestran en la figura 14 y en la tabla 5 (Mina, 2013).



**Figura 14.** Divisor capacitivo amortiguado de 300 kV (versión final)

Fuente: Laboratorio de Alta Tensión. Universidad del Valle.

**Tabla 5.** Especificaciones técnicas del DCA de 300 kV final.

Voltaje de entrada nominal	300 kV
Voltaje de entrada máximo	375 kV
Voltaje de salida nominal	353 V
Factores de escala	386:1
	822:1
Capacitancia de alto voltaje	800 pF
Capacitancia de bajo voltaje	0,33 $\mu$ F
	0,68 $\mu$ F
Resistencia de amortiguamiento	479 $\Omega$
Capacitancia parásita	43 pF
Inductancia parásita	35 $\mu$ H
Ancho de banda	2,1 MHz
Altura	2,2 m
Diámetro exterior de las placas (relajador de campo)	m

**Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se presentó y aplicó una metodología para el diseño, construcción y evaluación de un divisor capacitivo amortiguado de 300 kV. Se utilizaron algunos componentes existentes de un divisor del Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle.

La metodología desarrollada requirió del diseño y simulación de componentes del divisor a través de modelos eléctricos, los cuales facilitaron el ajuste de parámetros, por medio de herramientas computacionales, y su posterior verificación a través de ensayos eléctricos. Los modelos eléctricos propuestos en la metodología fueron suficientes para obtener resultados confiables en las simulaciones.

El resistor de amortiguamiento construido garantiza una impedancia puramente resistiva en un rango de frecuencia 20 Hz a 1 MHz.

Los factores de escala obtenidos experimentalmente son válidos dado que las diferencias porcentuales entre los voltajes máximos de las señales de impulso de los divisores resistivo y capacitivo

amortiguado, no supera el límite de variación de voltaje pico establecido por norma  $\pm 3$  %.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan un sincero agradecimiento al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle por su apoyo económico en el proyecto de grado "Rediseño de un prototipo de divisor de tensión capacitivo amortiguado de 300 kV para pruebas de tensión de impulso".

## REFERENCIAS

- Alfonso, A., Perdomo, L., Santamaría, F. y Gómez, C. (2014). Transient surges analysis in low voltage networks. *Tecnura*, 18(edición especial doctorado), 41-50. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.9241>
- Daum, W. y Lynch, A.C. (1989). A high-voltage high-frequency voltage divider (for power line transients monitoring). *IEE Proceedings A. Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education*, 136(5), 254-255. doi: <https://doi.org/10.1049/ip-a-2.1989.0042>
- García, D.F. y Rincón, D.F. (2009). Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 kV. *Tecnura*, 12(24), 1-10. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.6262>
- García, D.F., Marlés-Sáenz, E., Prado, T.A. y Martínez, M. (2009). Methodology for Lightning Impulse Voltage Divisors Design. *IEEE Latin America Transactions*, 7(1), 71-77. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2009.5173467>
- IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques (2013). En *IEEE Std 4-2013 (Revision of IEEE Std 4-1995)*, pp.1-213. doi: [10.1109/ieeestd.2013.6515981](https://doi.org/10.1109/ieeestd.2013.6515981).
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2010). *IEC 60060-2 High-voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems*. Geneva, Switzerland.



- Kovačević, U., Brajović, D., Stanković, K. y Osmokrović, P. (2016). Measurement uncertainty of fast pulse voltages measurements with capacitive divider. En *2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, pp.649-653. doi: <https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2016.8012783>
- Kuffel, E., Zaengl, W. y Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering- Fundamentals*. 2a. ed. Toronto. Newnes. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-075063634-6/50002-2>
- Mina, J.D. (2013). *Rediseño de un prototipo de divisor de tensión capacitivo amortiguado de 300 kV para pruebas de tensión de impulso*. Cali: Universidad del Valle, Biblioteca Digital. doi: <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a6>
- Ortiz, A.J., Jiménez, R. y Ramos, O.L. (2014). Inspección de calidad para un sistema de producción industrial basado en el procesamiento de imágenes. *Tecnura*, 18(41), 76-90. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.3.a06>
- Pan, Y., Shao, H., Xiao, D., Lai, L., Shi, L., Zhou, L. y Zhao, W. (2015). Development of 300-kV Air-Insulation Standard Impulse Measurement System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(6), 1627-1635. doi: <https://doi.org/10.1109/tim.2015.2408799>
- Passon, S., Gitin, I. y Meisner, J. (2016). Investigating the properties of precision resistors for the application in high voltage DC dividers. En *2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)* (pp. 1-6). doi: <https://doi.org/10.1109/amps.2016.7602872>
- Pattanadech, N., Potivetkul, S. y Yuttagowith, P. (2006). Corona Phenomena of Various High Voltage Shielding Types. En *2006 International Conference on Power System Technology* (pp. 1-6). Chongqing. doi: <https://doi.org/10.1109/icpst.2006.321552>
- Pattarakijkul, D., Kurupakorn, C. y Charoensook, A. (2010). Construction and evaluation of 100 kV DC high voltage divider. En *CPEM 2010* (pp. 677-679). doi: <https://doi.org/10.1109/cpem.2010.5543420>
- Prochazka, R., Hlavacek, J., Knenicky, M. y Mahmoud, R. (2016). Determination of frequency characteristics of high voltage dividers in frequency domain. En *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (pp. 1-4). doi: <https://doi.org/10.1109/epe.2016.7521821>
- Teachawong, M. y Trakulkan, C. (2014). Design and invention a 150 kV capacitive high voltage divider set. En *The 4th Joint International Conference on Information and Communication Technology, Electronic and Electrical Engineering (JICTEE)* (pp. 1-5). doi: <https://doi.org/10.1109/jictee.2014.6804114>
- Vera, M.M. y Prado, T. (2006). *Diseño y construcción de un divisor de tensión capacitivo amortiguado de 300 kV*. Cali: Universidad del Valle, Biblioteca Digital
- Yan, W., Zhao, W. y Li, Y. (2018). Effect of Step Response Measurement Arrangement on the Correction of Lightning Impulses Measured with Ultra-High-Voltage Dividers. En *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)* (pp. 1-2). doi: <https://doi.org/10.1109/cpem.2018.8501145>





## Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica

### Andesite rock fracture and spectral analysis of acoustic emission signals

Dino Alberto Filipussi<sup>1</sup>, Juan Pablo Muszkats<sup>2</sup>, Miryam Patricia Sassano<sup>3</sup>, Miguel Eduardo Zitto<sup>4</sup>, Rosa Piotrkowski<sup>5</sup>

**Fecha de recepción:** 12 de octubre de 2018

**Fecha de aceptación:** 15 de abril de 2019

**Cómo citar:** Filipussi, D., Muszkats, J., Sassano, M., Zitto, M., Piotrkowski, R. (2019). Fractura de roca andesita y análisis espectral de señales de emisión acústica. *Tecnura*, 23(61), 45-56. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.15361>

#### Resumen

**Contexto:** En las rocas sometidas a esfuerzos se producen señales de emisión acústica (EA). Esta y la información sísmica son complementarias tanto en sus aplicaciones como en su base teórica. Por ende, el estudio de frecuencias características en las señales de emisión acústica tiene relevancia para comprender la propagación de ondas sísmicas en la Tierra.

**Método:** Se realizó un ensayo de compresión uniaxial en probetas cilíndricas de roca andesita, llevadas hasta la rotura. Se registraron las señales de EA obtenidas durante el ensayo. Un análisis de las frecuencias de estas señales cabe en el contexto de un modelo elemental de foco sísmico, el cual describe el avance y la propagación de ondas durante la fractura de un material frágil. A partir de los espectros de Fourier de las señales, convenientemente representados en escala logarítmica, se obtiene la

frecuencia esquina. Este parámetro da cuenta del tamaño de las fisuras durante el avance del daño en el material sometido a esfuerzo.

**Resultados:** En un primer análisis se determinó la frecuencia esquina. En un segundo análisis, se filtraron las señales para distintas bandas de frecuencias con transformada Wavelet y se obtuvo el Wavelet Energy b-value (bWE) correspondiente.

**Conclusiones:** El estudio de la evolución del bWE para las distintas bandas de frecuencia permitió determinar frecuencias características que se pueden asociar a distintos mecanismos de fracturas en las rocas.

**Palabras clave:** emisión acústica, frecuencia esquina, roca andesita, transformada Wavelet, b-value.

#### Abstract

**Context:** Stressed rocks produce acoustic emission signals. Acoustic emission and seismic information are complementary in their applications as well as

- 1 Licenciado en Ciencias Físicas, doctor en Ingeniería. Profesor en la Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín. Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, Departamento ICES. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: [filipuss@cnea.gov.ar](mailto:filipuss@cnea.gov.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9585-3043>
- 2 Licenciado en Matemática, magíster en Ingeniería Matemática. Profesor adjunto, Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. Junín, Argentina. Contacto: [jpmuszkats@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:jpmuszkats@comunidad.unnoba.edu.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8176-558X>
- 3 Licenciada en Matemática, magíster en Ingeniería Matemática. Profesora adjunta, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: [psassano@fi.uba.ar](mailto:psassano@fi.uba.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5802-4756>
- 4 Licenciado en Ciencias Físicas, magíster en Simulación Numérica y Control. Profesor adjunto, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: [mzitto@fi.uba.ar](mailto:mzitto@fi.uba.ar) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6423-1719>
- 5 Licenciada en Ciencias Físicas, doctora en Ciencias Físicas. Centro de Matemática Aplicada, Universidad Nacional de San Martín. Profesora consulta asociada, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Contacto: [rosap46@gmail.com](mailto:rosap46@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6004-5679>

on their theoretical basis. Thus, studying characteristic frequencies in acoustic emission signals is relevant to understanding the seismic wave propagation on the Earth.

**Method:** A uniaxial compression test was performed on cylindrical samples of andesite rock, which were stressed up to breakage. Acoustic emission signals were recorded during the test. Frequency analysis in these signals may be carried in the context of an elementary seismic focus model. This model describes the fracture advance and propagation during brittle material fracture. The corner frequency is obtained from the Fourier spectrum of the signals, conveniently represented in log scale. This parameter accounts

for the size of fissures as damage progresses when the material is stressed.

**Results:** The corner frequency was determined on a first analysis. On a second analysis, the signals were filtered on different bands with the Wavelet Transform and the corresponding wavelet energy b-value was obtained.

**Conclusions:** Studying the evolution of the wavelet energy b-value in different frequency bands allowed the determination of characteristic frequencies which can be associated with different fracture regimes in rocks.

**Keywords:** acoustic emission, corner frequency, andesite rock, wavelet transform, b-value.

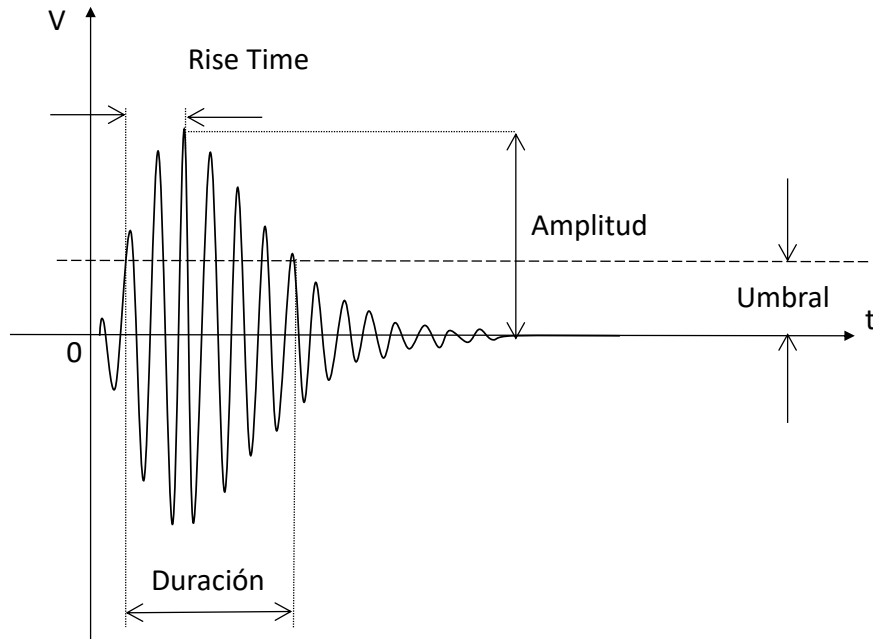
## INTRODUCCIÓN

En el interior de los materiales sometidos a esfuerzos se generan ondas elásticas producidas por la deformación del material y otras fuentes, como las debidas al crecimiento de fisuras, movimiento de dislocaciones, rotura de inclusiones, etc. La técnica de emisión acústica (EA) permite obtener información de estos procesos, detectar y medir estas ondas con sensores piezoeléctricos que transforman la señal mecánica en señal eléctrica. Las ondas elásticas provenientes del interior del material son registradas sobre la superficie, donde se ubican los sensores piezoeléctricos. Estas señales, en la forma de ráfagas llamadas *hits*, son procesadas para su posterior análisis. La señal eléctrica de EA es de muy baja amplitud ( $10 \mu\text{V}$ ) y de alta frecuencia (50 kHz a 1 MHz). Como se ilustra en la [figura 1](#), exhibe eventos discretos con forma de pulsos oscilantes que alcanzan una amplitud máxima en un tiempo de subida (*rise time*) de la señal, para luego amortiguarse.

El equipo de EA ([figura 2](#)) cuenta con una placa electrónica que se encarga de la toma de las amplitudes de la señal en función del tiempo, con lo cual es posible observar la forma de onda de la

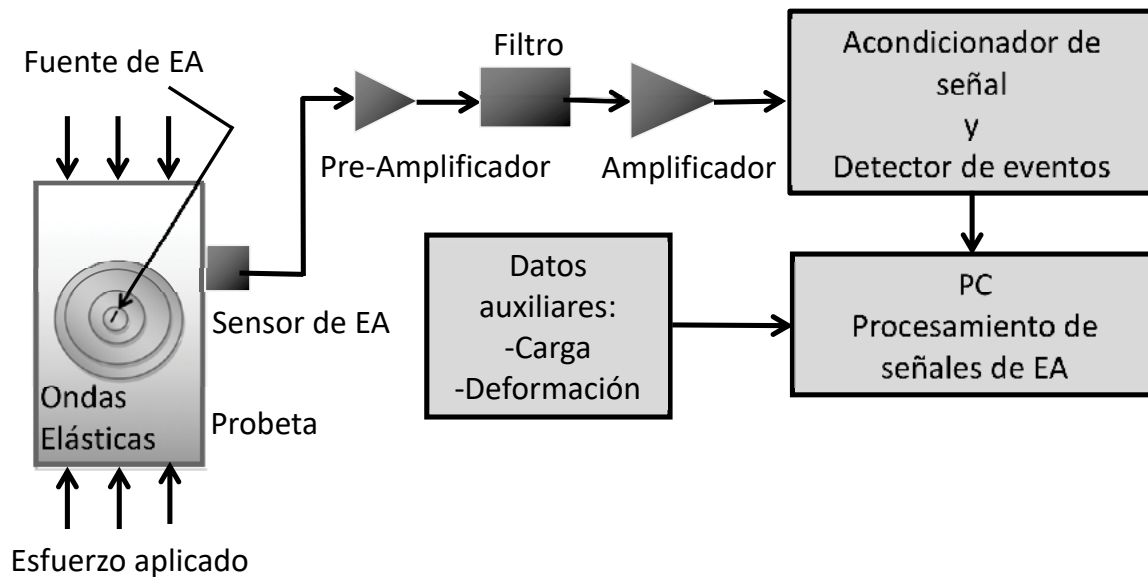
señal; más tarde la placa procesa esta información y computa los valores de los parámetros característicos de la señal: energía, valor cuadrático medio (valor *RMS*), amplitud, *rise time*, duración del evento, etc. Esta técnica de EA proporciona un método para caracterizar los daños que sufre el material cuando es llevado a la rotura y dar cuenta, entre otros, de los procesos de microfisurado, crecimiento de fisuras y, por último, la coalescencia en macrofisuras hasta la rotura final del material.

Desde la década de 1960 se registran artículos sobre fractura de rocas sometidas a compresión (Hoek y Bieniawski, 1965; Lockner, 1993; Scholz, 1968) y es también un tema de actualidad por sus aplicaciones (Mirmohammadlou, Memarian, Mohammadi y Jafari, 2017). Resulta interesante observar que la EA es generada en distintas escalas espaciales y temporales abarcando desde la ruptura de ligaduras atómicas hasta fallas sísmicas. Por ello, la información sísmica y la EA son complementarias, tanto en sus aplicaciones como en su base teórica. A partir de esta idea, para dar cuenta de los procesos de daño en un material rocoso sometido a esfuerzos, hay trabajos (Carpinteri, Lacidogna y Puzzi, 2009; Rao y Prasanna Lakshmi, 2005; Shiotani, Yuyama, Li, y Ohtsu, 2001; Zhang,



**Figura 1.** Señal de EA y parámetros que la caracterizan

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 2.** Equipo de EA. Adquisición y procesamiento de datos

**Fuente:** elaboración propia.

2018) que estudian el valor del *b-value*. Este parámetro surge de la distribución del número acumulado de *hits* de EA en función de su respectiva

amplitud. Se comprueba que la relación en escala *log-log* es lineal y es conocida su aplicación en la sismica como *ley de Gutenberg-Richter*.

## METODOLOGÍA

### Diseño experimental

Siguiendo el trabajo de Filipussi *et al.* (2015), se ensayaron cuatro probetas cilíndricas de 75 mm de diámetro y 150 mm de largo, sobre testigos de andesita extraídos *in situ* de roca del Cerro Blanco, provincia de San Juan, Argentina. Estas probetas fueron ensayadas a compresión simple uniaxial y llevadas a la rotura. Se utilizó una máquina marca CGTS de 100 toneladas de capacidad, de tipo servohidráulica y lazo cerrado donde se impuso una velocidad de desplazamiento de actuador de 0,12 mm/min. La figura 3 muestra el arreglo experimental de una probeta de andesita instrumentada con sensores de EA.

Se emplearon tres sensores piezoeléctricos para monitorear la EA. En la superficie de la probeta se colocaron dos sensores, uno sintonizado a 60 kHz y otro a 150 kHz. Al tercero, de banda ancha, se lo adhirió al plato de carga inferior teniendo en cuenta la propiedad de buena guía de onda del metal involucrado. El equipo de EA se completó con una placa de dos canales de (Physical Acoustic Corporation) y

se utilizó el *software* comercial *AEWIN* para el análisis y determinación de la mayoría de los parámetros característicos de las señales.

### Modelo de fractura. Frecuencia esquina

D. Filipussi, Piotrkowski, y Ruzzante (2012) simulan una señal de EA cuya fuente es una fisura que se propaga en un medio material frágil, homogéneo e isótropo, a partir de un modelo de fractura cuyos fundamentos provienen de la geofísica (Aki y Richards, 1980). La duración del evento de EA, su amplitud y tiempo de subida son estimados por el modelo y se relacionan con características de la fuente. El análisis del espectro de Fourier de la señal de EA obtenida del modelo está dado por la ecuación (1).

$$|\hat{\Omega}(\omega)| = \frac{U_0 A}{\sqrt{1 + \omega^2 T}} \left| \frac{\text{sen}\left(\frac{\tau_0 \omega}{2}\right)}{\frac{\tau_0 \omega}{2}} \right| \quad (1)$$

Donde, es la transformada de Fourier del campo de desplazamiento;  $U_0$ , el valor máximo alcanzado por la discontinuidad del desplazamiento en la fractura;  $A$ , el área de la fractura;  $T$ , el tiempo en



**Figura 3.** Configuración experimental y equipo de medición de EA

**Fuente:** elaboración propia.

alcanzar la discontinuidad un 63 % de  $U_0$ , y  $\tau_o$ , el tiempo de subida de la señal a detectar. En el espectro teórico determinado por el modelo se observa que la señal es constante a bajas frecuencias y luego decrece a frecuencias más altas con la inversa del cuadrado de la frecuencia. La frecuencia de encuentro de estas dos tendencias del espectro en una escala *log-log* se denomina *frecuencia esquina*  $f_c$ . El modelo predice también que la longitud de la fractura es inversamente proporcional a la frecuencia esquina y está dada por la ecuación (2).

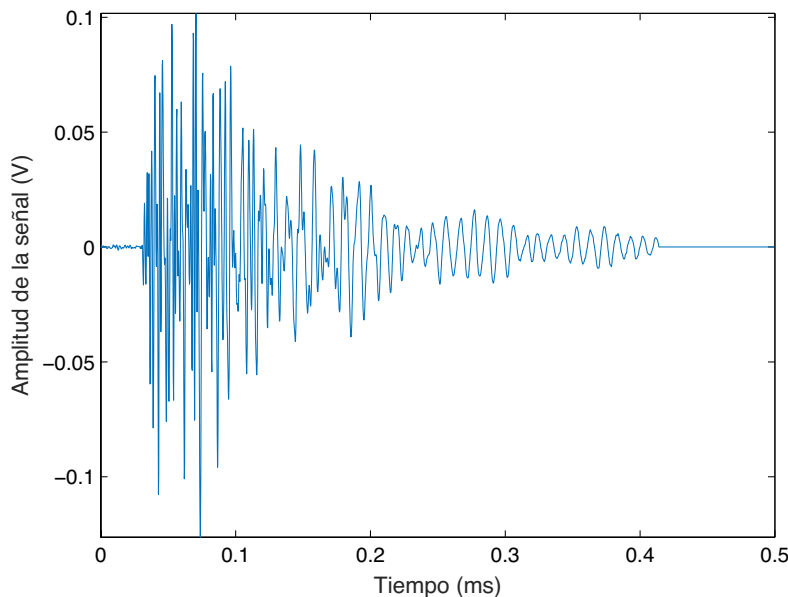
$$L = \frac{v}{2\pi f_c(1 - \eta \cos\theta)} \quad (2)$$

Donde  $\hat{\Omega}(\omega)$ ,  $L$  es la longitud de la fisura;  $\eta = \frac{v}{c}$  es la proporción entre la velocidad de avance de la fractura y la velocidad de onda del sonido en el medio material ( $\eta$  vale cerca de 1 para un material frágil);  $\theta$  es el ángulo de detección respecto a la línea de avance de la fractura.

En este trabajo se estimó la longitud de las fisuras con esta última ecuación, a través de la medición de las frecuencias esquinas de las señales adquiridas en los instantes de tiempo en que la energía del *hit* alcanza valores máximos relativos. Se consideró que  $\eta = 0.7$  por ser el material frágil, que la detección fue aproximadamente en la línea de avance de la fractura ( $\theta = 0^\circ$ ) y que la velocidad de propagación de onda en la andesita es  $c = 4500 \frac{m}{s}$  como se menciona en Schön (2011).

En la [figura 4](#) se muestra un *hit* y en la [figura 5](#) su correspondiente espectro en escala *log-log*, donde se indica la frecuencia esquina determinada por el punto de intersección de las tendencias a baja y alta frecuencia.

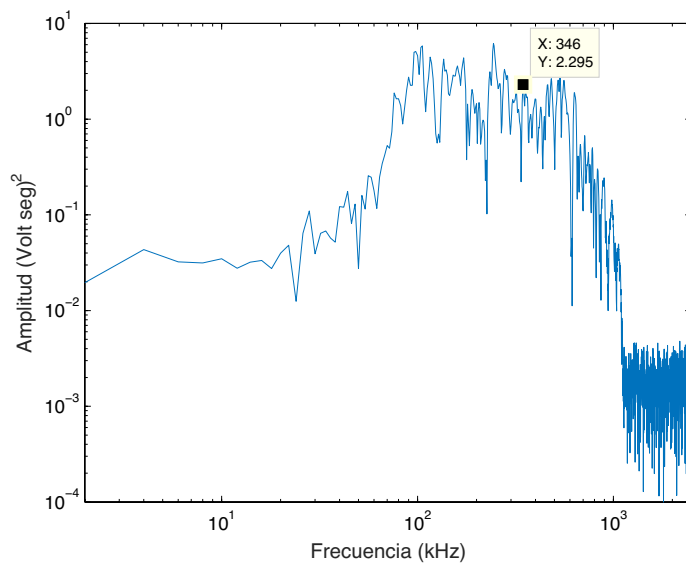
Los *hits* seleccionados para la obtención de la frecuencia esquina corresponden a aquellos intervalos de tiempo donde el valor cuadrático medio RMS de las señales alcanza un máximo relativo, como se muestra en la [figura 6](#).



**Figura 4.** Gráfico de un *hit*

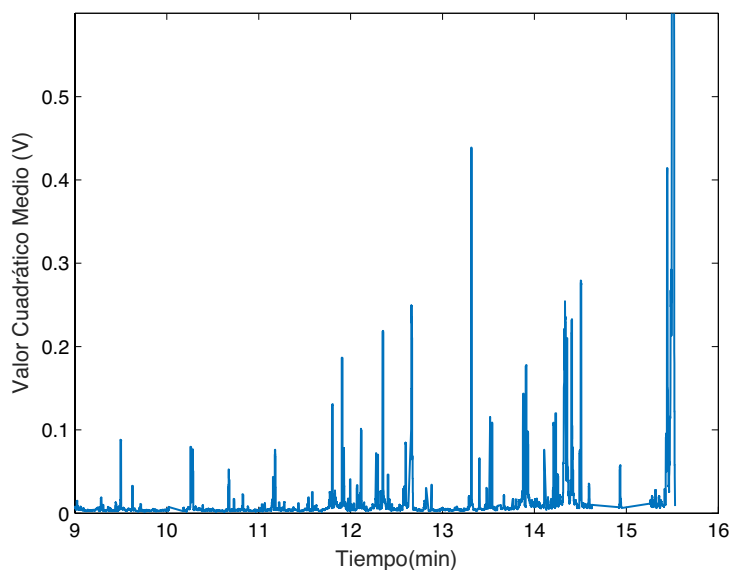
**Fuente:** elaboración propia.





**Figura 5.** Espectro de Fourier de un *hit* en escala *log-log* con frecuencia esquina 302,1 kHz

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Valor cuadrático de cada *hit* en función del tiempo del ensayo

**Fuente:** elaboración propia.

La [tabla 1](#) detalla los valores de frecuencia esquina determinados para los tiempos indicados

que corresponden a un intervalo de tiempo que contiene a un máximo relativo de RMS.

**Tabla 1.** Frecuencia esquina y su correspondiente longitud de fisura

Tiempo (s)	Frecuencia Esquina (kHz)	Longitud de la fisura (mm)
615,60	239,6	5,53
615,74	302,1	4,39
615,88	197,9	6,70
616,02	270,8	4,89
616,18	302,1	4,39
616,34	354,2	3,74
616,52	270,8	4,89
616,73	291,7	4,54
616,91	302,1	4,39
617,18	291,7	4,54

Fuente: elaboración propia.

## Transformada Wavelet continua

La transformada wavelet continua (*Continuous Wavelet Transform*, CWT) permite, como la transformada de Fourier, estudiar las componentes de frecuencia de una señal. Además, brinda información acerca de la localización temporal de dichas componentes. Siguiendo la exposición de Boggess y Narcowich (2009), se considera una función Wavelet  $\Psi(t)$  que cumpla con los requisitos de ser continua, tener decaimiento exponencial e integral nula en  $\mathbb{R}$ . Bajo estas condiciones, la CWT de una función  $f \in L^2(\mathbb{R})$  es la función  $W_f: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{C}$  definida por la ecuación (3).

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

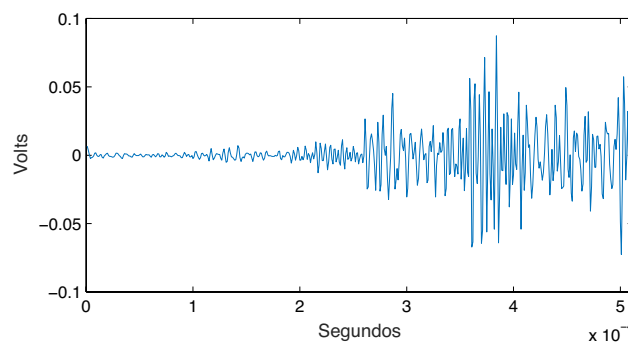
En el caso en que  $a \neq 0$ , mientras que  $W_f(0, b) = 0$ . La integral definida por la ecuación (3) compara la función  $f(t)$  con la Wavelet  $\Psi(t)$  después de un cambio de escala y una traslación temporal. De esta forma, el valor  $W_f(a, b)$  mide la componente en frecuencia de la señal  $f(t)$  proporcional a  $(1/a)$  y localizada en torno al tiempo  $b$ .

En el presente trabajo se utilizó la Wavelet de Morlet definida por la ecuación (4).

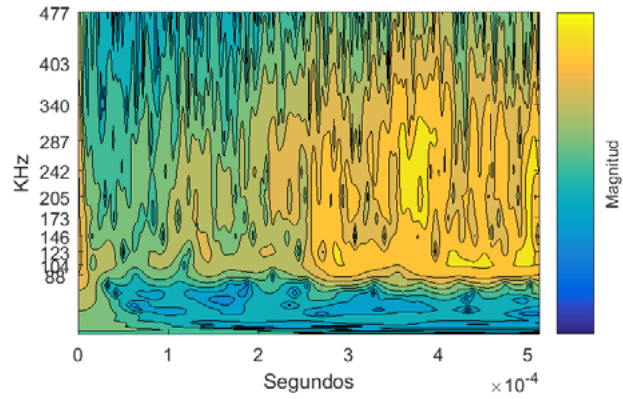
$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \cdot e^{6it} \cdot e^{-t^2/2} \quad (4)$$

Los detalles de implementación de la CWT para señales discretas pueden consultarse en el trabajo clásico de Torrence y Compo (1998). En la [figura 7](#) se ilustra uno de los *hits* estudiados y en la [figura 8](#) su correspondiente escalograma, es decir, un gráfico de la densidad de energía Wavelet correspondiente a cada tiempo y frecuencia.

A partir de la transformada Wavelet de una señal pueden filtrarse las frecuencias indeseadas eliminando los coeficientes correspondientes y reconstruyendo la señal. En la [figura 9](#) se ilustra el *hit* anterior filtrado entre 240 kHz y 300 kHz, y en la [figura 10](#), su correspondiente escalograma.

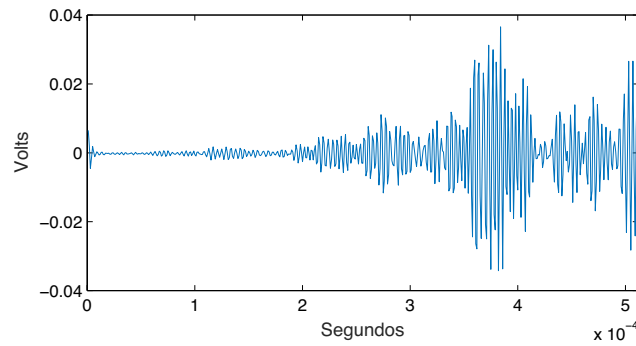
**Figura 7.** Gráfico de un *hit*

Fuente: elaboración propia.



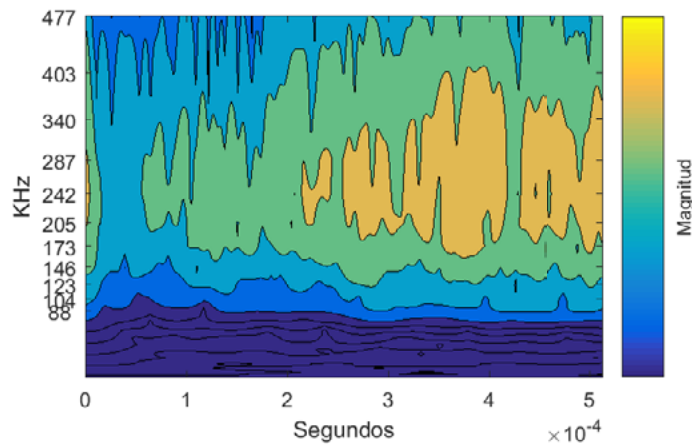
**Figura 8.** Escalograma de un *hit*

**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 9.** Gráfico de un *hit* filtrado

**Fuente:** elaboración propia.

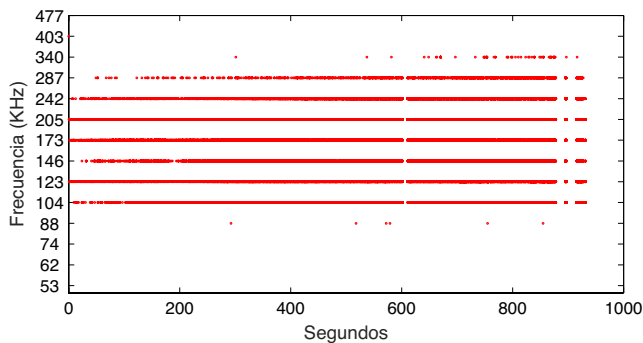


**Figura 10.** Escalograma de un *hit* filtrado

**Fuente:** elaboración propia

## Aplicación al ensayo

Al aplicar la CWT a cada *hit* registrado en el ensayo se conocen sus componentes de frecuencia localizadas en el tiempo. El gráfico de la [figura 11](#) representa para cada *hit* la frecuencia de mayor energía. En el eje vertical se expresa la frecuencia en kHz y en el eje horizontal el tiempo real en segundos de ocurrencia del *hit* durante el ensayo. Se aprecia que las componentes de mayor frecuencia se manifiestan hacia el final del ensayo.



**Figura 11.** Frecuencia de máxima energía de cada *hit*

**Fuente:** elaboración propia.

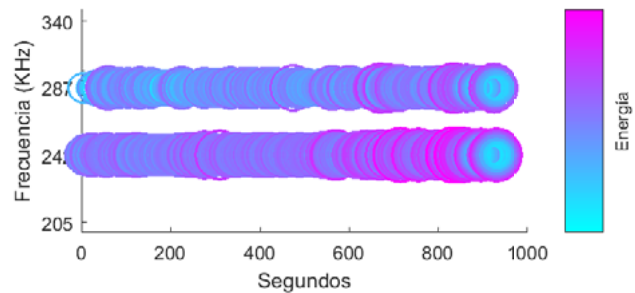
**Tabla 2.** Conteo de *hits* a diferentes frecuencias

Frecuencia (kHz)	Cantidad de <i>hits</i>
88	6
104	7066
123	21386
146	6589
173	10373
205	12769
242	15603
287	1527
340	66
403	1

**Fuente:** elaboración propia.

Las dos frecuencias para las cuales se alcanza más veces el máximo de energía son 123 kHz y 242 kHz. La [figura 12](#) se obtuvo después de filtrar

los *hits* para valores próximos a la frecuencia esquina: entre 240 kHz y 300 kHz. Una vez más, se indica la frecuencia a la que cada *hit* alcanza su máxima energía. En esta ocasión, se agrega un círculo cuyo diámetro y color responden al nivel de energía alcanzado. Aunque no es concluyente, se aprecia cierta tendencia a que los *hits* más energéticos se den hacia el final del ensayo.



**Figura 12.** Frecuencias características luego de filtrar en base a la frecuencia esquina

**Fuente:** elaboración propia.

## Wavelet energy b-value

Siguiendo a Sagasta *et al.* (2018), se presenta una adaptación de la ley de Gutenberg-Richter usada en sismología. En este contexto, la EA se interpreta como sismología de pequeña escala. Para ello se considera la energía wavelet (*AEE*) de cada señal reconstruida luego del filtrado (ecuación (5)).

$$AEE = \sum x_i^2 \cdot \Delta t \quad (5)$$

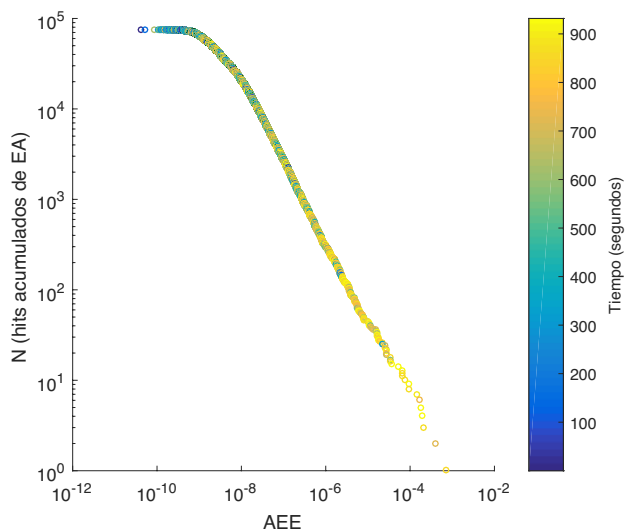
Luego se la vincula con la cantidad *N* de *hits* cuya energía supera un valor dado de *AEE*. La [figura 13](#) ilustra esta relación para la probeta del ensayo, con los *hits* reconstruidos luego del filtrado entre 240 kHz y 300 kHz. Para cada *hit* representado se asigna además un color que indica su ocurrencia en el tiempo. Una vez más se aprecia que los *hits* de mayor energía ocurren hacia el final del ensayo.

Como sugiere el gráfico, se puede postular una relación lineal entre los logaritmos de estas variables (ecuación (6)).

$$\log_{10}N(AEE) = a - b_E \cdot \log_{10}(AEE) \quad (6)$$

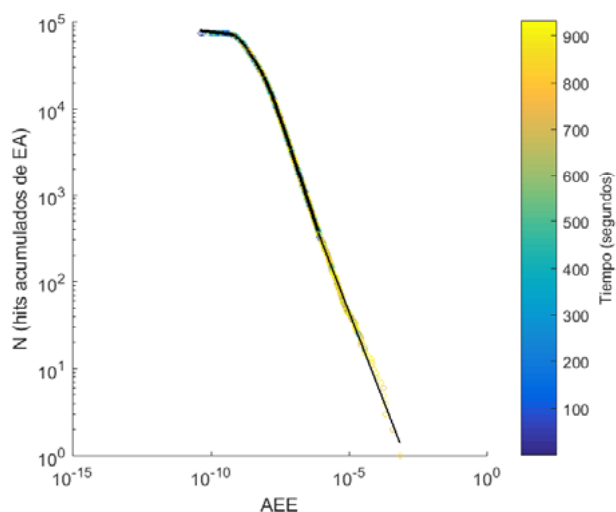
El *Wavelet Energy b-value* (bWE) se define justamente como el valor  $b_E$  de esta fórmula. Un

valor grande de  $b_E$  indica una rápida variación de  $N$  con respecto a la energía, lo cual representaría un régimen de fractura estable. Esto es usualmente indicativo de una gran cantidad de eventos de energía relativamente baja, lo cual es consistente con procesos de creación de microfisuras o de crecimiento lento de fisuras. En cambio, un valor pequeño de  $b_E$  indica



**Figura 13.**  $N$  vs  $AEE$

**Fuente:** elaboración propia.

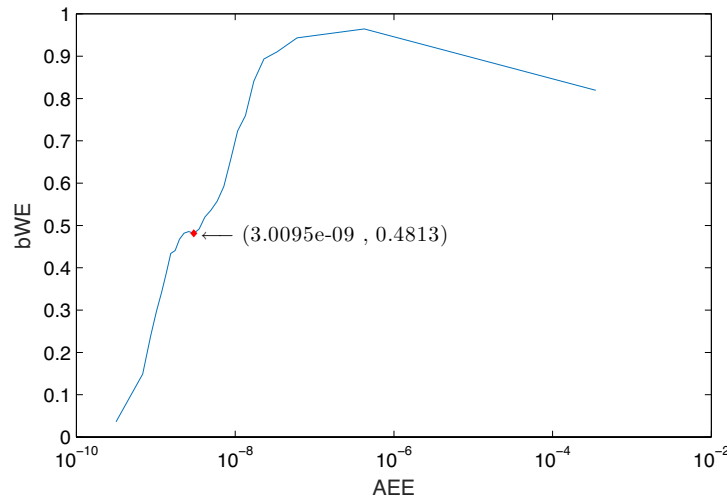


**Figura 14.**  $N$  vs.  $AEE$ . Ajuste por cuadrados mínimos

**Fuente:** elaboración propia.

una variación brusca de energía en pocos *hits*, lo que sugiere la formación de macrofracturas o crecimiento rápido de fracturas. Es importante identificar los valores de energía para los cuales se alcanzan mínimos locales del índice. La

figura 14 ilustra las rectas de cuadrados mínimos obtenidas al dividir el intervalo de *AEE* en subintervalos de igual cantidad de *hits* y calcular  $b_E$  en cada uno de ellos. La figura 15 muestra el bWE obtenido para distintos subintervalos.



**Figura 15.** bWE obtenido para distintos subintervalos

**Fuente:** elaboración propia.

## RESULTADOS

La frecuencia característica obtenida mediante la CWT resulta consistente con los resultados para la frecuencia esquina (ver tabla 2, donde se hace el conteo de *hits* a diferentes frecuencias).

El estudio de la evolución del bWE para las distintas bandas de frecuencia sugiere la existencia de energías características que se pueden asociar a distintos mecanismos de fracturas en las rocas. Los mínimos locales de bWE (figura 15) identifican estos valores críticos de AEE.

## CONCLUSIONES

A partir de un ensayo de una probeta de andesita bajo compresión uniaxial llevada a la rotura y del registro de EA mediante un sensor de banda ancha, se pudo identificar en los *hits* de mayor energía

una frecuencia esquina del orden de 300 kHz que se correspondió con una longitud de fisura del orden de 5 mm.

Los resultados obtenidos con el análisis Wavelet permiten una mayor precisión en la determinación de frecuencias características, que fueron 123 kHz y 242 kHz, siendo esta última consistente con la frecuencia esquina. La combinación de ambos criterios, frecuencia esquina y máximo de energía de la CWT permitió, filtrando entre 240 kHz y 300 kHz, encontrar con precisión las frecuencias de 242 kHz y 287 kHz que se podrían asignar a mecanismos de fractura. El bWE calculado en la banda 240-300 kHz permitió hallar, mediante la localización de mínimos locales, valores críticos de energía que identificarían la aparición de macrofisuras. Los *hits* de mayor energía se manifiestan preponderantemente hacia el final del ensayo.



## FINANCIAMIENTO

Comisión Nacional de Energía Atómica, Centro Atómico Constituyentes, gerencia Desarrollo Tecnológico y Proyectos Especiales, Departamento ICES.

Este trabajo tiene apoyo financiero y es parte del Programa UBACyT 20020160100038BA.

## REFERENCIAS

- Aki, K. y Richards, P.G. (1980). *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. Sausalito, CA: University Science Book. Recuperado de [https://books.google.com.ar/books?id=k8R\\_QgAACAAJ](https://books.google.com.ar/books?id=k8R_QgAACAAJ)
- Boggess, A. y Narcowich, F.J. (2009). *A first course in wavelets with Fourier analysis*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons, Inc. doi: <https://doi.org/10.1063/1.1485592>
- Carpinteri, A., Lacidogna, G. y Puzzi, S. (2009). From criticality to final collapse: Evolution of the “b-value” from 1.5 to 1.0. *Chaos, Solitons and Fractals*, 41(2), 843-853. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2008.04.010>
- Filipussi, D.A., Guzmán, C.A., Xargay, H.D., Hucaíluk, C. y Torres, D.N. (2015). Study of Acoustic Emission in a Compression Test of Andesite Rock. *Procedia Materials Science*, 9, 292-297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.MSPRO.2015.04.037>
- Filipussi, D., Piotrkowski, R. y Ruzzante, J. (2012). Characterization of a Crack by the Acoustic Emission Signal Generated During Propagation. *Procedia Materials Science*, 1, 266-272. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.036>
- Hoek, E. y Bieniawski, Z.T. (1965). Brittle fracture propagation in rock under compression. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(3), 137-155. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00186851>
- Lockner, D. (1993). The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* y *Geomechanics Abstracts*, 30(7), 883-899. doi: [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)90041-B](https://doi.org/10.1016/0148-9062(93)90041-B)
- Mirmohammadlou, A., Memarian, H., Mohammadi, S. y Jafari, M. (2017). Experimental and Numerical Investigation of Rock Dynamic Fracture. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 51(1), 37-46. doi: <https://doi.org/10.22059/IJMGE.2017.62151>
- Rao, M.V.M.S. y Prasanna Lakshmi, K.J. (2005). Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture. *Current Science*, 89(9), 1577-1582. doi: <https://doi.org/10.2307/24110936>
- Sagasta, F., Zitto, M.E., Piotrkowski, R., Benavent-Climent, A., Suarez, E. y Gallego, A. (2018). Acoustic emission energy b -value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 102, 262-277. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.09.022>
- Scholz, C.H. (1968). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 73(4), 1417-1432. doi: <https://doi.org/10.1029/JB073i004p01417>
- Schöñ, J. (2011). *Physical properties of rocks: a workbook*. Amsterdam: Elsevier.
- Shiotani, T., Yuyama, S., Li, Z.W. y Ohtsu, M. (2001). Application of AE improved b-value to quantitative evaluation of fracture process in concrete materials. *Journal of Acoustic Emission*, 19, 118-133.
- Torrence, C. y Compo, G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(1), 61-78. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0061:APG-TWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APG-TWA>2.0.CO;2)
- Zhang, J. (2018). Investigation of Relation between Fracture Scale and Acoustic Emission Time-Frequency Parameters in Rocks. *Shock and Vibration*, 2018, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/3057628>





## Ajuste de la protección de sobreexcitación ANSI 24 para un generador sincrónico en un relé SIEMENS 7UM62

### Adjusting ANSI 24 overexcitation protection in a synchronous generator for a SIEMENS 7UM62 relay

Nayiver Gladys Caicedo Delgado<sup>1</sup>, Carlos Alberto Andrade Alegría<sup>2</sup>

**Fecha de recepción:** 27 de agosto de 2018

**Fecha de aceptación:** 15 de febrero de 2019

**Cómo citar:** Caicedo D., G. y Andrade, C.A. (2019). Ajuste de la protección de sobreexcitación ANSI 24 para un generador sincrónico en un relé SIEMENS 7UM62. *Tecnura*, 23(61), 57-68. doi: <https://doi.org/10.14483/22487638.13785>

#### Resumen

**Contexto:** Las funciones de protección de un grupo generador-transformador deben garantizar su vida útil cuando se presenta una condición de operación anormal, de esta manera se mejora la confiabilidad del servicio de energía eléctrica en el sistema eléctrico de potencia. Cuando la relación V/Hz del grupo se incrementa puede presentarse saturación en el núcleo magnético, induciendo un flujo de dispersión en los componentes no laminados que no están diseñados para conducirlo y puede ocurrir daño en segundos; razón por la cual, estas máquinas se protegen con la función de protección (FDP) ANSI 24.

**Metodología:** Este artículo presenta la teoría que justifica la implementación de la FDP ANSI 24 en un grupo generador-transformador y la metodología para calcular cada uno de sus parámetros de ajuste en un relé multifuncional Siemens 7UM62. La originalidad del artículo radica en que se explica su diagrama lógico de decisión de una manera clara y detallada, identificando las señales de entrada: ajustes, analógicas y binarias, y sus señales de salida.

Este diagrama lógico se organizó en 3 subdiagramas para facilitar su comprensión e identificar las causas que originan sus salidas de alarmas, arranque, disparos o bloqueo.

**Resultados:** Se obtuvo el diagrama de decisión detallado de la FDP ANSI 24, se describieron los criterios de ajuste de entrada de cada uno de los parámetros de ajustes y un procedimiento detallado para calcular cada uno. También, se obtuvieron los resultados numéricos de todos los ajustes para el grupo generador-transformador de la Unidad 1 de la Central Hidroeléctrica de Salvajina.

**Conclusiones:** Se recomienda para una mayor precisión en los parámetros de ajuste obtener la característica de calentamiento V/Hz real o entregada por el fabricante de los equipos a proteger.

**Palabras claves:** ANSI 24, generador sincrónico, protecciones eléctricas.

#### Abstract

**Context:** The protection functions of a generator-transformer group must guarantee its useful life when an abnormal operating condition arises, thus

- 1 Ingeniera electricista, magíster en Sistemas de Generación de Energía, doctora en Ingeniería. Línea de énfasis en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Profesora titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle. Cali, Colombia. Contacto: [nayiver.gladys.caicedo@correounivalle.edu.co](mailto:nayiver.gladys.caicedo@correounivalle.edu.co) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-7465>
- 2 Ingeniero electricista, Ingeniero electricista de la Empresa Proing S.A. Su línea de trabajo es el diseño eléctrico en Cali. Cali, Colombia. Contacto: [auxiliardisenos2@proing.com](mailto:auxiliardisenos2@proing.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7698-7644>

improving the reliability of the electric power service in the electric power system. When the V/Hz ratio of the group increases, saturation may occur in the magnetic core and induce a dispersion flow in the non-laminated components that are not designed to conduct it, and damage can occur in seconds. This is the reason why machines are protected with the ANSI 24 protection function (FDP).

**Methodology:** This article presents the theory that justifies the implementation of the ANSI 24 protection function in a generator-transformer group, as well as the methodology to calculate each of the adjustment parameters in a SIEMENS 7UM62 multifunctional relay. The article explains the logical decision diagram in a clear and detailed way, identifying the settings, input signals (analog and binary), and output signals. The logical diagram was organized in three subdiagrams to facilitate understanding and to

identify the causes that originate its alarm, start, trip, or block outputs.

**Results:** The detailed decision diagram of the ANSI 24 protection function was obtained; the input adjustment criteria of the adjustment parameters and a detailed procedure for calculating each were described. In addition, the numerical results of all the adjustments for the generator-transformer group of Unit 1 of the Salvajina hydroelectric power station were obtained.

**Conclusions:** The results of this research recommend obtaining the actual V/Hz heating characteristic or confirming the one delivered by the manufacturer of the equipment to be protected, so that it is possible to have greater precision in the adjustment parameters.

**Keywords:** ANSI 24, synchronous generator, electrical protections

## INTRODUCCIÓN

Los generadores sincrónicos son los encargados de suministrar potencia eléctrica a las diferentes cargas, garantizando un proceso continuo y efectivo durante su funcionamiento. Razón por lo cual se han implementado diferentes funciones de protección que permiten proteger la máquina al presentarse distintas fallas propias del generador o del sistema eléctrico de potencia al que está conectado (Muñoz y Caicedo, 2018).

Cuando hay desviaciones en frecuencia o tensión, se pueden presentar esfuerzos térmicos y dieléctricos que pueden causar grandes daños de manera rápida en el generador o transformador. Por ello, se debe garantizar que se cumplan las normas de los límites operativos especificados por sus fabricantes.

La sobreexcitación medida en bornes del generador se da cuando la magnitud que relaciona la tensión y la frecuencia expresada como voltios/Hertz (V/Hz), sobrepasa los límites establecidos por las normas ANSI/IEEE definidas en IEEE Guide for AC Generator Protection (2006), la cual para

los generadores es 1,05 p.u. (base del generador) y para los transformadores es 1,05 p.u. (base del secundario del transformador) a carga nominal, y f.p. de 0,8 o 1,1 p.u. (base del transformador) sin carga.

Cuando la relación de V/Hz es excedida de un valor puede haber saturación en el núcleo magnético del generador o transformador, induciendo un flujo de dispersión en componentes no laminados que no están diseñados para soportarlo, y se producen pérdidas por corrientes parásitas en los componentes adyacentes al núcleo, como en cuñas de ranura o componentes de ensamblaje; este flujo puede producir un daño en segundos. Estas pérdidas producen un incremento de la temperatura del equipo, lo que ocasiona un deterioro del aislamiento en segundos; por esta razón, las máquinas se protegen con la FDP ANSI 24. Esta calcula en por ciento o en unidad el nivel de sobreexcitación en la máquina; es decir, la relación entre la tensión y la frecuencia (V/Hz). A mayor porcentaje mayor sobreexcitación y a menor porcentaje menor sobreexcitación. Las curvas límite de sobreexcitación (V/Hz vs. tiempo) de los generadores y

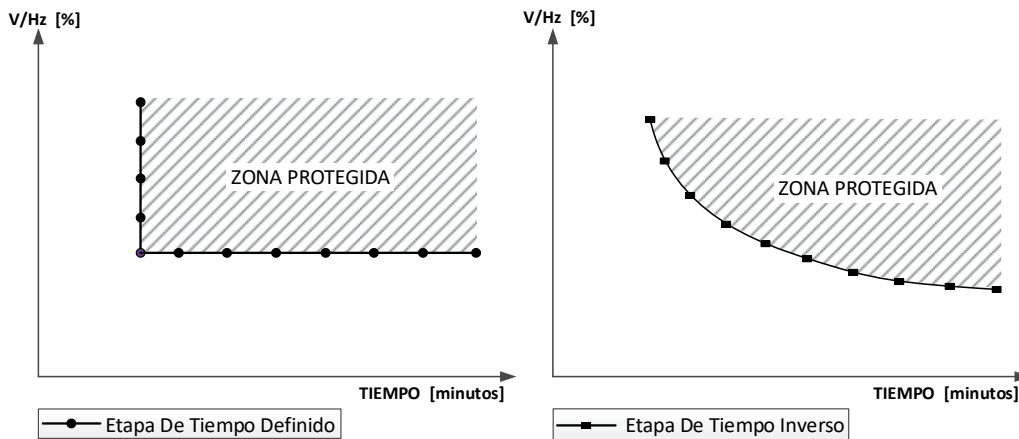
transformadores en operación sin carga deben ser suministradas por sus respectivos fabricantes.

En la [figura 1](#) se ilustran las dos etapas básicas de protección de la función V/Hz: la de tiempo definido y la de tiempo inverso. Las regiones sombreadas corresponden a las zonas protegidas por las etapas de protección.

Para un grupo generador-transformador se estandarizan sus dos curvas, es decir se deben referir a una misma tensión base, que generalmente es a la tensión nominal de salida del generador.

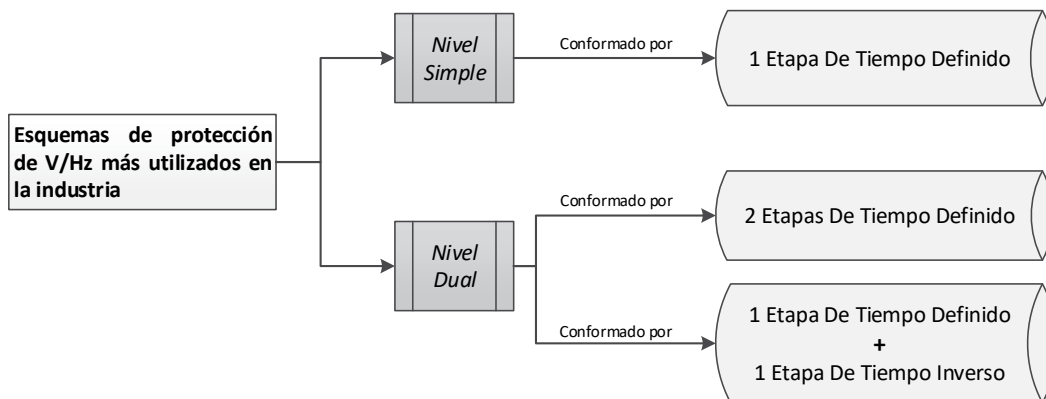
En la [figura 2](#) se presentan tres esquemas de protección comúnmente empleados en la industria para esta función de protección V/Hz. Una desventaja de emplear un esquema de protección que solo utilice dos características de tiempo definido consiste en que pueden quedar áreas del grupo generador-transformador sin proteger. Por esta razón, se combinan las funciones de protección de tiempo definido con las de tiempo inverso, ya que proporcionan una mejor coordinación con los límites operativos del equipo.

En la [figura 3](#) se muestra el resultado de unificar las curvas para un grupo generador transformador.



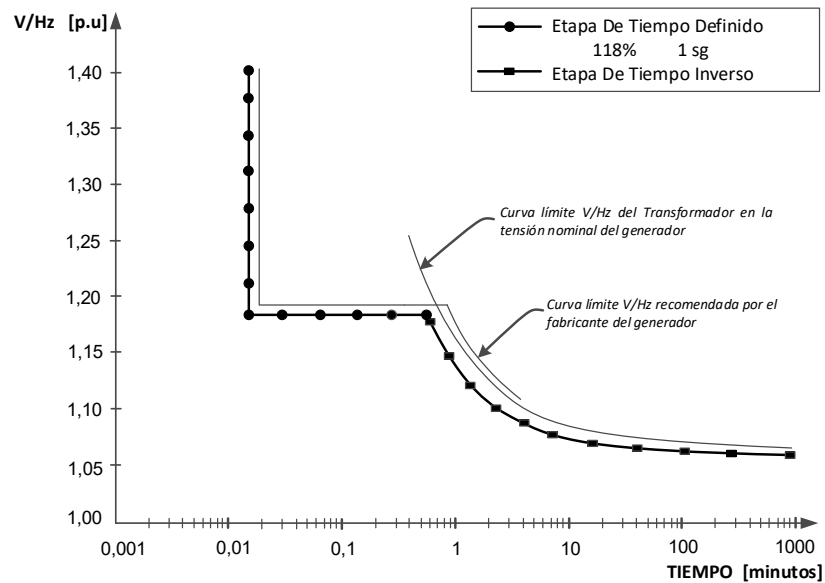
**Figura 1.** Curvas límite V/Hz sin carga de generadores y transformadores

Fuente: Siemens (2009).



**Figura 2.** Esquemas V/Hz utilizados en un grupo generador-transformador

Fuente: Ceballos (2014).



**Figura 3.** Curva límite V/Hz de un grupo generador-transformador para una etapa de tiempo definido más otra de tiempo inverso

Fuente: Ceballos (2014).

### ¿Qué causa la sobreexcitación en generadores?

Una sobreexcitación excesiva en un generador excederá la capacidad del aislamiento del devanado del estator del generador, sin embargo, esta FDP V/Hz no podrá detectar todas las condiciones de sobretensión y debe ser respaldada por otras funciones de protección que protejan la máquina en caso de falla.

Según Ceballos (2014), una condición de sobreexcitación puede ocurrir por varias circunstancias:

- Pérdida de una unidad de generación cercana, lo cual afecta el flujo de reactivos y se refleja como una caída de tensión. En un intento de mantener la tensión del sistema mientras que el generador disparado se reconecta, los sistemas de excitación de los generadores restantes tratan de reforzar la tensión terminal, llevando al límite el control de excitación. Si durante este intervalo ocurre una falla en el control de la excitación, habrá una sobreexcitación.

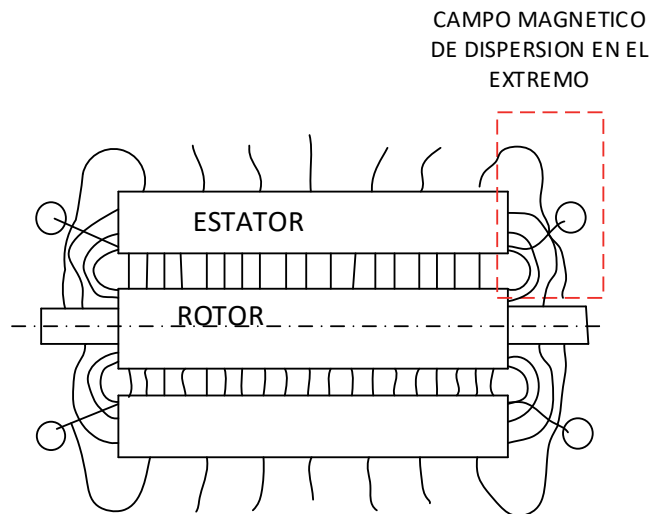
- Un generador operando a niveles nominales puede suministrar al sistema de potencia un nivel alto de VAR y su tensión puede permanecer cerca de los niveles nominales de la red debido a las interconexiones. Si en estas condiciones hay una pérdida súbita de carga o de las interconexiones y los controles de excitación del generador no responden adecuadamente, la tensión de la unidad puede elevarse súbitamente, originando una sobreexcitación.
- Cuando una unidad de generación está conectada al sistema de potencia, a través de líneas de transmisión largas y ocurre una apertura de su interruptor principal, puede darse una autoexcitación, si la admitancia de carga en los terminales del generador es mayor que la admitancia de eje en cuadratura  $1/X_q$ ; esto debido a que el regulador de tensión presenta una retroalimentación positiva que puede causar una rápida elevación de tensión (IEEE Guide for AC Generator Protection, 2006).

La [figura 4](#) ilustra una sección transversal axial de un turbogenerador que muestra la densidad del

campo magnético principal y la densidad del flujo de dispersión. La densidad del campo magnético de dispersión es dañina en los extremos del núcleo magnético del generador, debido a que puede inducir altas corrientes parásitas y por tanto alta temperatura y mayores pérdidas.

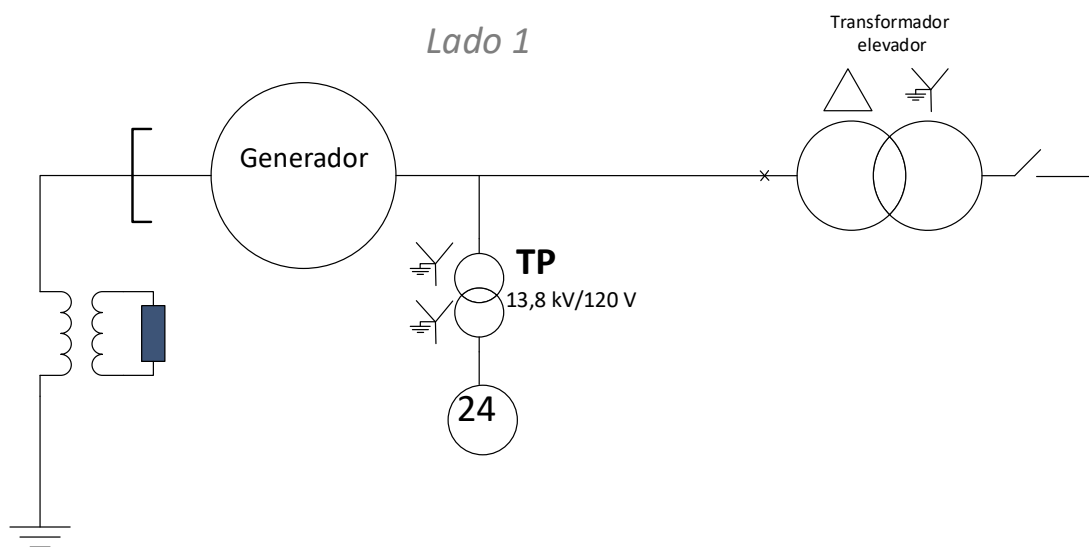
### Conexión de los TP función ANSI 24

La función ANSI 24 del relé Siemens 7UM62 mide las tensiones de línea del generador a través de los transformadores de potencial de protección (TP), como se ilustra en la [figura 5](#).



**Figura 4.** Flujos magnéticos de dispersión en un turbogenerador

**Fuente:** IEEE Guide for AC Generator Protection (2006).



**Figura 5.** Conexión de los TP en los bornes de un generador para la conexión de la FDP ANSI 24

**Fuente:** elaboración propia.



A partir de la señal de tensión, el relé mide la amplitud o el valor en RMS y calcula la frecuencia a partir de esta señal. El nivel de sobreexcitación de manera porcentual o en PU se calcula mediante la ecuación (1).

$$\text{sobreexcitación} = \frac{\frac{V_{medida}}{V_{nominal}}}{\frac{f_{medida}}{f_{nominal}}} = \frac{V}{f} [\text{pu o \%}] \quad (1)$$

La señal de tensión para el relé se toma de una fase del generador, si existe un fusible fundido o una conexión incompleta del circuito y no existe ninguna tensión censada por el relé, no habría protección. Por este motivo, se debe utilizar un TP en cada fase para tener una mejor confiabilidad.

## METODOLOGÍA DE AJUSTE DE LA FUNCIÓN ANSI 24

A continuación, en la metodología para el ajuste de la FDP ANSI 24 se describen: las señales de entrada y salida, los diagramas funcionales de decisión y los criterios de ajuste de las señales de entrada requeridas para el relé Siemens 7UM62.

En la [tabla 1](#) se detallan la dirección cada una de las entradas y su descripción utilizadas en el diagrama lógico de decisión de la función ANSI 24 (SIEMENS, 2009).

**Tabla 1.** Entradas del diagrama lógico de decisión de la función de protección ANSI 24

Dirección	Entrada	Descripción
Entrada de ajuste [4301]	(On-Off-Block Relay) Overexcitation Protection	Para activar la protección 24 seleccione ( <i>On</i> ), para desactivarla seleccione ( <i>Off</i> ), para bloquear seleccione ( <i>Block Relay</i> ).
Entrada de ajuste [4302]	24-1 V/f Pickup>	Primer ajuste de sobreexcitación. Una vez superado este umbral de sobreexcitación, se habilita la característica de tiempo inverso. También, se activa una alarma para avisar con un tiempo de retardo.
Entrada de ajuste [4303]	24-1 V/f Time Delay>	Tiempo de ajuste, el cual inicia una vez superado el primer ajuste de V/Hz (4302). Cuando se termina el tiempo de retardo, se activa la alarma para dar aviso a los operarios sobre la condición de sobreexcitación.
Entrada de ajuste [4304]	24-2 V/f Pickup>>	Segundo tiempo de ajuste de sobreexcitación. Este umbral se configura normalmente en valores altos de V/Hz. Una vez superado este umbral de sobreexcitación, se emite disparo con un tiempo de retardo.
Entrada de ajuste [4305]	24-2 V/f Time delay>>	Segundo ajuste de tiempo asociado al segundo ajuste de V/Hz>> (4304).
Entrada de ajuste [4306-4313]	Time Delay	Ocho ajustes de tiempo de retardo asociados a los ocho valores de V/Hz que conforman la característica de tiempo inverso.
Entrada de ajuste [4314]	Time for Cooling Down	Es el tiempo de enfriamiento del generador hasta su valor de temperatura inicial, después de haber disparado por sobreexcitación.

Fuente: Siemens (2009).

En la [tabla 2](#) se presentan la dirección de salida y la descripción de las salidas: arranque, disparo y bloqueo de FDP ANSI 24 SIEMENS (2009).

### Diagrama lógico de la protección de sobreexcitación (ANSI 24)

El diagrama lógico de la función de protección ANSI 24 del relé Siemens 7UM62 se compone de tres etapas como se ilustra en ([figura 6](#)). La

primera, de tiempo definido, calcula la relación V/Hz>; en esta se define el primer *pickup* de la sobreexcitación. En la segunda, correspondiente a la característica térmica de la máquina, se construye una curva de tiempo inverso a través de los datos de entrada; aquí el relé arranca, emite alarma y, de ser necesario, da orden de disparo al interruptor principal para evitar calentamiento en el generador. Y, en la tercera etapa, de tiempo definido, se detectan fallas que sobrepasan un valor de *pickup*

**Tabla 2.** Salidas del diagrama lógico de decisión de la función de protección ANSI 24

Dirección	Salida	Descripción
Salida [5353]	Bloqueo externo de la función ANSI 24	Entrada binaria externa que indica si la función de protección ANSI 24 se encuentra bloqueada.
Salida [5357]	Reset externo de memoria	Entrada binaria externa para restablecer la memoria de la réplica térmica.
Salida [5361]	Anuncio <i>Off</i> de la función ANSI 24	Indica que la función ANSI 24 se encuentra apagada.
Salida [5362]	Anuncio Bloqueo de la función ANSI 24	Indica si la función de protección ANSI 24 se encuentra bloqueada para evitar disparos al interruptor.
Salida [5363]	Anuncio <i>On</i> de la función ANSI 24	Indica que la función ANSI 24 se encuentra encendida.
Salida [5367]	Alarma V/Hz>	Alarma que se activa cuando se cumple el tiempo de retardo de esta etapa (24-1 V/f> <i>Time Delay</i> ), y que muestra la sobreexcitación excesiva.
Salida [5369]	Reset memoria	Restablecer la memoria de la réplica térmica.
Salida [5370]	Arranque por V/Hz>	Señaliza que la función de protección ANSI 24 arrancó, cuando el valor de sobreexcitación supere el valor ajustado en la entrada.
Salida [5371]	Disparo por V/Hz>>	Disparo que se activa cuando se cumple el tiempo de retardo de esta etapa (24-2 V/f>>), y que muestra la sobreexcitación excesiva.
Salida [5372]	Disparo por V/Hz> th.	Disparo que se activa cuando se cumple el tiempo de retardo de esta etapa (24-1 V/f>), y que muestra la sobreexcitación excesiva.
Salida [5373]	Arranque por V/Hz>>	Señaliza que la función de protección ANSI 24 arrancó, cuando el valor de sobreexcitación supere el valor ajustado en la entrada.

Fuente: SIEMENS (2009).

V/Hz>>ajustado, para posteriormente despejarlas o dar una señal de alarma.

### Subdiagramas lógicos de la función de protección ANSI 24 de relé SIEMENS 7UM62

A continuación, se describen los 3 subdiagramas de la función de sobreexcitación.

#### *Subdiagrama lógico de sobreexcitación por V/Hz> de la función de protección ANSI 24*

En la [figura 7](#) se ilustra el primer subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 24, donde se compara el ajuste de *pickup* del nivel de sobreexcitación V/Hz> con el valor real medido, si el ajuste es mayor y la función se encuentra activa y no está bloqueada, se presenta una señal de salida de arranque de la FDP ANSI 24, y activa un contador cuyo tiempo es comparado con un tiempo de permanencia ajustado en la entrada V/Hz *Time Delay*> [4303]; cuando el tiempo del contador es mayor que el tiempo ajustado, se genera

una alarma porque el valor de sobreexcitación es mayor que V/Hz *pickup*> y permaneció durante un tiempo mayor que V/Hz *Time Delay*> [4303].

#### *Subdiagrama lógico de la FDP ANSI 24 por sobreexcitación de la característica de tiempo inverso*

En la [figura 8](#) se ilustra el segundo subdiagrama de la función de protección ANSI 24, que corresponde a la característica térmica de tiempo inverso de la máquina, la cual produce una señal de disparo si se cumplen dos condiciones: a) que el valor V/Hz medido se encuentre dentro del rango de la curva de tiempo inverso, lo cual lo verifica mediante los valores de V/Hz> y V/Hz, y b) que la máquina se encuentra fría. Una vez cumplidas estas dos condiciones se activa un contador y se calcula el tiempo de disparo mediante la característica de tiempo inverso. El tiempo del contador es comparado con el tiempo calculado y, cuando este es superado, se da orden de disparo en la zona de característica térmica.

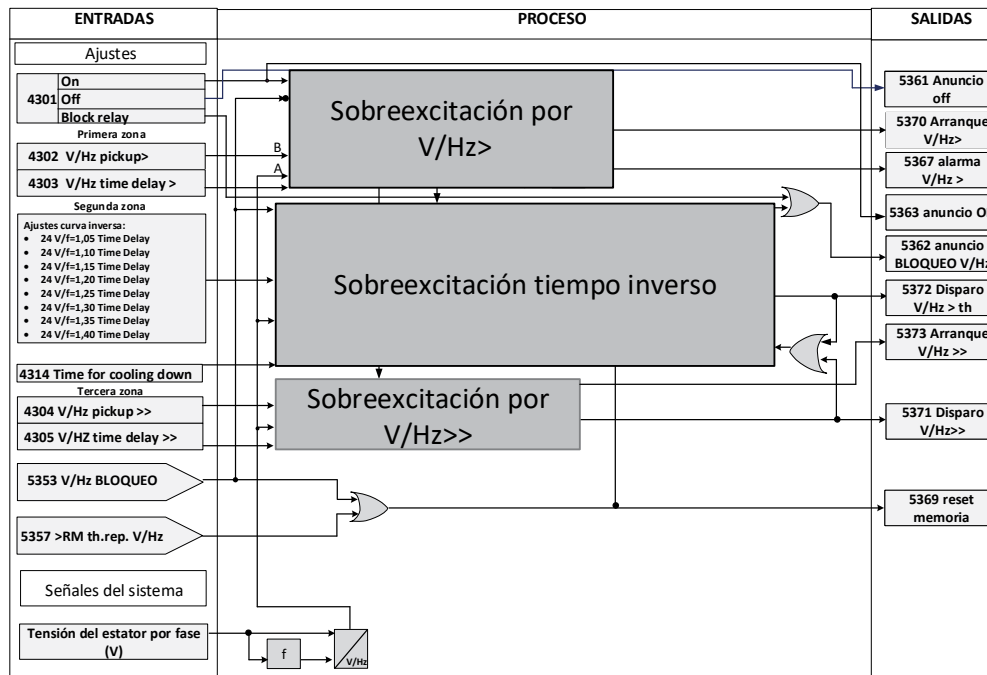


Figura 6. Diagrama lógico de decisión completo de la función ANSI 24

Fuente: elaboración propia.

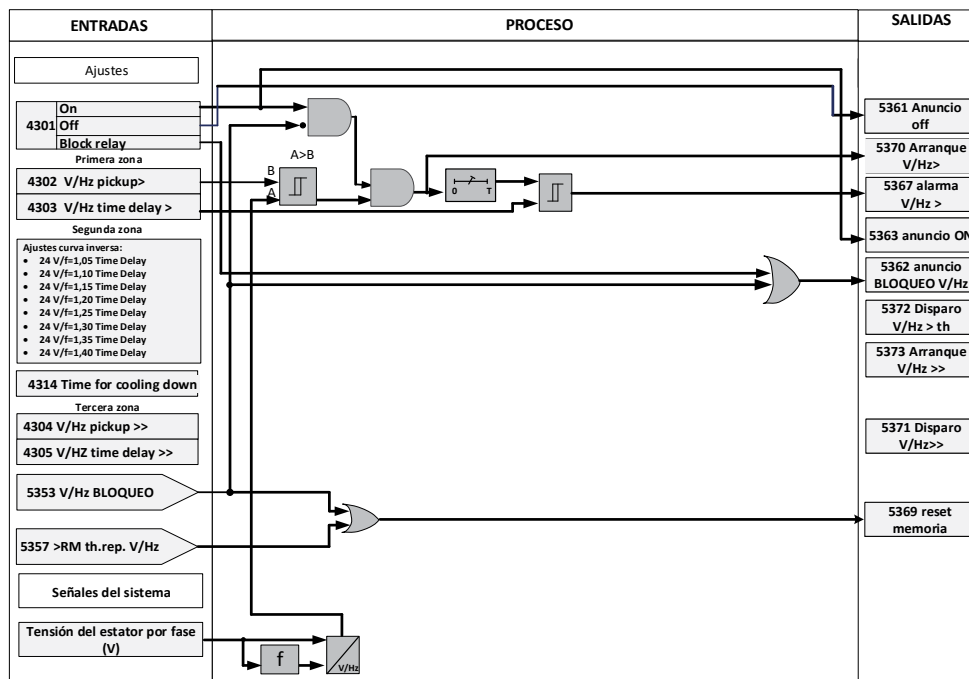
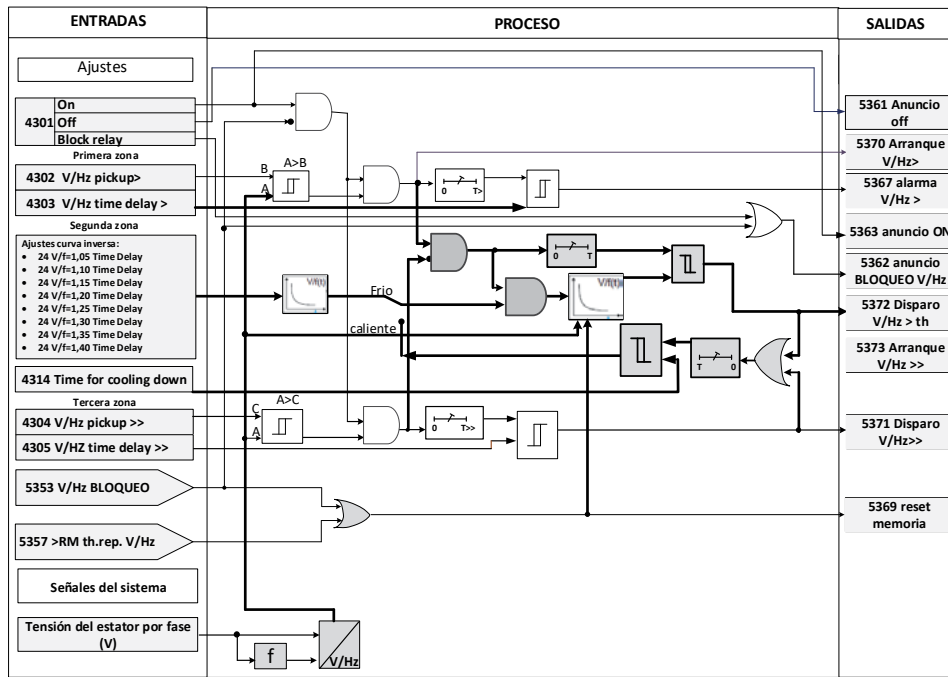


Figura 7. Subdiagrama lógico de decisión de la FDP ANSI 24. Etapa sobreexcitación por V/Hz>

Fuente: elaboración propia.



**Figura 8.** Subdiagrama lógico de decisión de la FDP ANSI 24. Etapa de sobreexcitación por la característica de tiempo inverso

**Fuente:** elaboración propia.

- *Etapa de enfriamiento.* Inmediatamente después de la orden de disparo por condición de sobreexcitación en la característica inversa como se ilustra en la [Figura 8](#), se activa un contador cuyo tiempo es comparado con el tiempo de ajuste  $t_{for\ cooling}$  [4314], mientras el tiempo del contador sea menor al tiempo  $t_{for\ cooling}$ , la función ANSI 24 permanecerá en estado caliente. Cuando se cumple el tiempo de enfriamiento de la máquina, la función de protección se desbloquea y pasa a estado frío.

#### Subdiagrama lógico de sobreexcitación por V/Hz>> de la función de protección ANSI 24

En la [figura 9](#) se ilustra el tercer subdiagrama lógico de la función de protección ANSI 24, donde se compara el ajuste de pickup del nivel de sobreexcitación V/Hz>> con el valor real medido, en este

caso los valores de sobreexcitación son muy elevados. Si el ajuste es mayor y la función se encuentra activa y no está bloqueada, se presenta una señal de salida de arranque de la FDP ANSI 24, y activa un contador cuyo tiempo es comparado con un tiempo de permanencia ajustado en la entrada V/Hz Time Delay>> [4305]; cuando se supera el tiempo ajustado se da orden de disparo al interruptor principal asociado al generador.

#### Ajustes de la función ANSI 24 del relé 7UM62 para un generador sincrónico

En la [tabla 3](#) se detalla la información del generador de la Unidad 1 de la Central Hidroeléctrica de Salvajina, requerida para realizar de ajuste de la función ANSI 24.

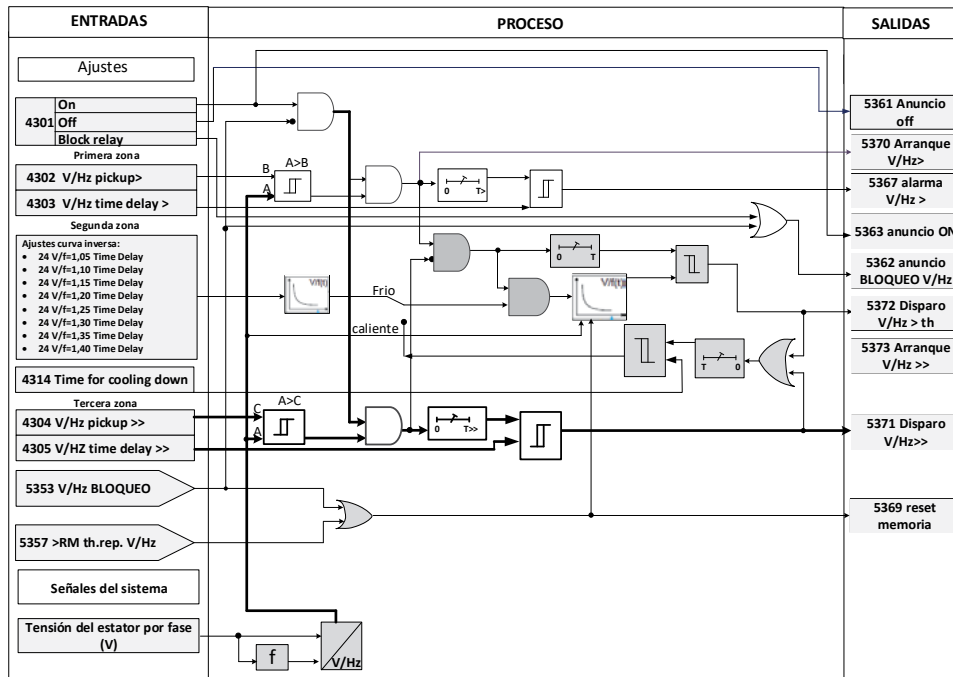


Figura 9. Subdiagrama lógico de decisión de la FDP ANSI 24. Etapa de sobreexcitación por V/Hz>>

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Parámetros técnicos del generador

Gen	Vnom(kV)	S (MVA)	FP	$X_d$ (p.u.)	$X_d'$ (p.u.)	$X_d''$ (p.u.)	$X_q$ (p.u.)	$X_q''$ (p.u.)	$X_2$ (p.u.)	$X_0$ (p.u.)
Salvajina G1	13,8	125	0,94	1,16	0,35	0,26	0,83	0,3	0,28	0,2

Fuente: EPSA-Celsia Vicepresidencia de Generación (2018).

A continuación, se muestran los ajustes realizados para la Unidad 1 de la Central Hidroeléctrica de Salvajina:

- [4301] On/Off se selecciona en On.
- [4302] Ajuste de  $\frac{U}{f} > pickup$ . Teniendo en cuenta que este escalón corresponde a la señal de alarma se parametriza a un valor de 110 % coordinando con la función de sobretensión, ya que un aumento de la relación V/Hz se puede ver con mayor frecuencia por un aumento de la tensión en escenarios de operación en donde se esté suministrando potencia reactiva a la red (Muñoz y Aragón, 2008).

$$\frac{U}{f} > pick up = 110\% \frac{U_{nfase}}{60Hz} = \frac{115/\sqrt{3}}{60} = \frac{1,217V}{Hz} \quad (2)$$

- [4303] Ajuste  $T \frac{U}{f} > Time Delay$ . El rango de selección del relé está entre 0 y 60 segundos y se selecciona 10 segundos, que es ajuste por defecto. Es decir:  $T \frac{U}{f} \geq 10s$
- [4306]- [4313] Ajustes curva característica térmica inversa. Teniendo en cuenta que no se cuenta con la curva V/Hz dada por el fabricante del generador, la característica térmica se parametriza con los puntos dados por el manual del relé (SIEMENS, 2009), como se detalla en la tabla 4.

**Tabla 4.** Interfaz para el ajuste de los puntos de la característica térmica del grupo generador-transformador

Característica térmica		
No.	Settings	Value
4306	U/f= 1,05 <i>Time Delay</i>	6000 s
4307	U/f= 1,10 <i>Time Delay</i>	15 s
4308	U/f= 1,15 <i>Time Delay</i>	10 s
4309	U/f= 1,20 <i>Time Delay</i>	5 s
4310	U/f= 1,25 <i>Time Delay</i>	2 s
4311	U/f= 1,30 <i>Time Delay</i>	1 s
4312	U/f= 1,35 <i>Time Delay</i>	0 s
4313	U/f= 1,40 <i>Time Delay</i>	0 s

Fuente: EPSA-Celsia Vicepresidencia de Generación (2018).

Si se cuenta con las características térmicas V/Hz-tiempo entregadas por el fabricante del generador y del transformador, se considera como referencia la curva térmica del equipo que para un mismo valor de V/Hz se calienta con mayor rapidez. La curva de la FDP ANSI 24 debe estar ajustada por debajo de la curva de referencia, con el fin de lograr su disparo antes de alcanzar el valor límite de calentamiento permitido.

- [4314] *Time for cooling down*. Tiempo de enfriamiento de la máquina. Su rango de ajuste está entre 0 y 20 000 s, se ajusta en el valor defecto de 3600 s.
- [4304] *Ajuste de  $\frac{U}{f} \gg pickup$* . Se propone parametrizar a un valor de 140 % con el fin de prestar un respaldo al escalón 2 de la función de sobreexcitación ANSI 59.

$$\frac{U}{f} \gg = 140\% \frac{U_{nfase}}{60Hz} = \frac{115/\sqrt{3}}{60} = \frac{1,549 V}{Hz} \quad (3)$$

- [4305] *Ajuste de *Time Delay T U/f >>**. El rango de selección del relé está entre 0 y 60 segundos y se selecciona 0 s, es decir su disparo en esta zona es instantáneo.

## RESULTADOS DE LOS AJUSTES DE LA FUNCIÓN ANSI 24 DEL GRUPO GENERADOR-TRANSFORMADOR DE LA UNIDAD 1 DE SALVAJINA

En la [tabla 5](#) se ilustra la interfaz gráfica de los ajustes de la protección de sobreexcitación cargados al relé 7UM62. Se recomienda para una mayor precisión en los parámetros de ajuste obtener la característica de calentamiento V/Hz real o entregada por el fabricante de los equipos a proteger.

**Tabla 5.** Interfaz gráfica de ajustes de la protección de sobreexcitación ANSI 24 [5]

No.	Settings	Value
4301	Overexcitation protection (U/f)	On
4302	U/f > <i>Pickup</i>	1,217
4303	T U/f > <i>Time Delay</i>	10
4304	U/f >> <i>Pickup</i>	1,549
4305	T U/f >> <i>Time Delay</i>	0

Característica térmica

No	Settings	Value
4306	U/f =1.05 <i>Time Delay</i>	6000
4307	U/f =1.10 <i>Time Delay</i>	15
4308	U/f =1.15 <i>Time Delay</i>	10
4309	U/f =1.20 <i>Time Delay</i>	5
4310	U/f =1.25 <i>Time Delay</i>	2
4311	U/f =1.30 <i>Time Delay</i>	1
4312	U/f =1.35 <i>Time Delay</i>	0
4313	U/f =1.40 <i>Time Delay</i>	0
4314	<i>Time for Cooling Down</i>	3600

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Se identificaron las consecuencias y los daños que puede provocar la sobreexcitación de un grupo generador-transformador, por lo cual se evidencia que es muy necesario el ajuste y activación de la función ANSI 24.



Se presentó de manera clara y ordenada la función ANSI 24 del relé Siemens 7UM62 mediante un diagrama funcional detallado, donde se identificaron las señales de entrada y las señales de salida. Además, se presentó la teoría y la metodología detallada del ajuste de la función ANSI 24 del relé Siemens 7UM62 para un grupo generador-transformador.

Para realizar un ajuste más preciso, es decir, evitar que el grupo se dañe por sobrecalentamiento debido al incremento de los V/Hz o que se dispare antes de su calentamiento, es necesario obtener la característica de calentamiento del equipo a proteger entregada por el fabricante o realizar pruebas para obtener la curva real. Finalmente, se presentó el ajuste de la función ANSI 24 de la Unidad 1 de la Central Hidroeléctrica de Salvajina.

## REFERENCIAS

- Ceballos M., J.S.C. (2014). *Criterios de ajuste para las protecciones de una unidad de generación de energía hidráulica en una PCH. Caso Amaine*. [Trabajo de grado]. Programa de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad del Valle. Cali, Colombia. doi: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n2.020>
- EPESA-Celsia Vicepresidencia de Generación (2018). Actualización del estudio de coordinación de protecciones U1 ch Salvajina. v1, Cali, Colombia.
- IEEE Guide for AC Generator Protection (2006). *IEEE Std C37.102-2006 (Revision of IEEE Std C37.102-1995)* (pp. 1-177). Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4109950>
- Muñoz, J.C. y Aragón, L.E. (2008). *Guía para la parametrización y pruebas de un relé numérico multifunción de protección de generador*. [Trabajo de grado]. Programa de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Departamento de Energética y Mecánica. Santiago de Cali, Colombia. doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019013>
- Muñoz, L. y Caicedo, G. (2018). *Protección pérdida de campo de excitación de un generador sincrónico para un relé siemens 7UM62*. [Trabajo de grado]. Programa de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad del Valle. Cali. doi: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2011.12n4.040>
- Siemens (2009). *SIPROTEC Multi-Functional Protective Relay 7UM62. Manual. V4.8;2013*. Recuperado de [https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=down-load&fct=-getasset&id1=DLA06\\_3361](https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=down-load&fct=-getasset&id1=DLA06_3361)





UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Revista *TECNURA*  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Facultad Tecnológica

### CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

### 1. ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, 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. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

*Tecnura* es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Copernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

*Tecnura* es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. 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.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista *Tecnura* tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

## 2. TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas (Publindex-Colciencias), la revista *Tecnura* recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

**Artículos de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

**Artículos de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

**Artículo de revisión:** documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

## 3. FORMATO DEL ARTÍCULO

### 3.1 Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse brevemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.
- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

### 3.2 De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

### 3.3 Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitalizarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.

- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

### 3.4 De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

#### *Composición de un artículo*

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

#### *Título*

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

#### *Autores*

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

#### *Resumen*

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

#### *Palabras clave*

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

#### *Abstract*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

#### *Keywords*

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: [http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf), <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Introducción*

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

### *Metodología*

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

### *Resultados*

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

### *Conclusiones*

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

### *Financiamiento*

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió dicha investigación.

### *Agradecimientos*

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

### *Ecuaciones*

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

### *Tablas*

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes,

considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Figuras*

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

### *Símbolos*

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades, dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

### Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista **Tecnura** es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía* de Microsoft Word (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:  
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....
- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha.  
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos.  
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al".  
En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según

el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

### Publicaciones Periódicas:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. *Título de la publicación*, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

#### Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### Libros:

#### Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>  
Apellidos, A. A. (Año). *Título*. doi: xx.xxxxxxxx  
Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). *Título*. Ciudad: Editorial.

#### Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Libro con editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas



### **Libro versión electrónica:**

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

### **Informe técnico:**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

### **Informe con autores**

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. *Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

### **Informe de una agencia del gobierno**

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

### **Tesis**

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). *Título*. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

### **Tesis inédita, impresa**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

### **Tesis de base de datos comercial**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible

en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

### **Tesis web**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

### **Estándares o patentes**

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

## **4. ENVÍO DE ARTÍCULOS**

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

### **4.1 Carta de presentación**

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.

- Exclusividad de su remisión a la revista *Tecnura*.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

#### 4.2 Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista *Tecnura*: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección "Formatos y Documentos". Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

#### 4.3 Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, "Formato del artículo", de la presente en las instrucciones a los autores.

### 5. PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista *Tecnura* para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.
4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.

6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación.
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista *Tecnura*.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

### 6. PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el

monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista *Tecnura* es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales

evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista *Tecnura*.

El Comité Editorial de la revista *Tecnura* se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

## 6. CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista *Tecnura*: [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com), o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista *Tecnura*, a la dirección:

Revista Tecnura  
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.  
Facultad Tecnológica  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003  
Celular: 57–3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
Email:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Página web:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

### *Tecnura journal* District francisco José de caldas university Faculty of technology

#### CONTENT

- **Scope and editorial policy of the journal**
- **Type of accepted articles**
- **Article format**
- **Article submission**
- **Publication procedure**
- **Article arbitration**
- **Contact**

#### SCOPE AND EDITORIAL POLICY OF THE JOURNAL

*Tecnura journal* is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of *Tecnura journal* are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

*Tecnura Journal* is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. *Tecnura Journal* has as mission

to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to *Tecnura journal* must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

*Tecnura* is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

*Tecnura* is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles

and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

## TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), *Tecnura* journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- ***Scientific and technological research articles:*** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- ***Reflection articles:*** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- ***Review article:*** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

## ARTICLE FORMAT

### About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

### About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

### About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

### About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

### Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.

- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.
- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

### *Title*

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

### *Authors*

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

### *Abstract*

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

### *Keywords*

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

[http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy\\_v101.pdf](http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf)

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

### *Abstract in Spanish*

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

### *Keywords in Spanish*

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

### *Introduction*

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

### *Methodology*

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

### *Results*

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.



### *Conclusions*

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

### *Financing*

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

### *Acknowledgments*

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

### *Equations*

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

### *Tables*

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Figures*

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in *Times New Roman* letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

### *Symbols*

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations- must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

### *Bibliographic references*

The adopted reference citation style by *Tecnura* journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en ....

- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.

La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).

- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) ....

- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al."

En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...

- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by *Tecnura* journal:

### **Periodical Publications:**

#### Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. *Title of the publication*, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

#### Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12 -23. doi:http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01

#### Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHz. *Revista Tecnura*, 18(42),

38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

### **Books:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). *Title*. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). *Title*. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). *Title*. City: Editorial.

#### Book with author

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

#### Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

#### Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

### **Technical report:**

#### Basic Form

Surnames, A. A. (Year). *Title*. (Report No. xxx). City: Editorial

#### Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico*. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

#### Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. *America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

**Thesis****Basic form**

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

**Unpublished thesis, printed**

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

**Commercial database thesis**

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

**Web thesis**

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de [http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis\\_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf](http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf)

**Standards or patents****Basic form**

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

**ARTICLE SUBMISSION**

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

**Cover letter**

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.
- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

**Article-authors information format**

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

**Article**

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

## PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.
10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

## ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must be international. Potential evaluators can belong to a university or industry, public or private; their

complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of *Tecnura* journal.

The Editorial Committee of *Tecnura* journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

## CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to *Tecnura* journal [tecnura@udistrital.edu.co](mailto:tecnura@udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com) or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of *Tecnura* Journal, to the following address:

*Tecnura* Journal  
Journals Room, Block 5, Office 305.  
Faculty of Technology  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur  
Phone: 571-3239300 Extension: 5003  
Mobile: 57-3153614852  
Bogotá D.C., Colombia  
Email:  
[tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co](mailto:tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co), [tecnura@gmail.com](mailto:tecnura@gmail.com)  
Web page:  
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>