

# Athenea

Revista en Ciencias de la Ingeniería

ISSN: 2737-6439

DOI: 10.47460/athenea

Volume 3, Issue 10

December 2022



Published by:

**AutanaBooks**  
*Engineering & Services*

ATHENEA JOURNAL

JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

Electronic Journal Edited By AutanaBooks.

Quarterly Periodicity

Our cover:



Engineering is seen as the most promising profession of the new times, with developments that transform the world.

Volume 3 // Issue 10 // December 2022  
DOI:10.47460/athenea  
ISSN: 2737-6439

Viewing the Journal:  
<https://athenea.autanabooks.com/index.php/revista>

#### TECHNICAL TEAM

Webmaster and Metadata  
Ing. Ángel Lezama (Quito, Ecuador).  
[a2lezama@gmail.com](mailto:a2lezama@gmail.com)

Graphic design and layout:  
Adrián Hauser  
(AutanaBooks, Ecuador).  
[adrian.hauser@gmail.com](mailto:adrian.hauser@gmail.com)

Translator: Fausto Bartolotta  
Via Francesco Crispi, 309/A  
98028 Santa Teresa Di Riva, Provincia Messina  
Italia  
email: [fbartolotta@gmail.com](mailto:fbartolotta@gmail.com)

The articles, opinions and collaborations that are published in this magazine do not necessarily represent the informative or institutional philosophy of AutanaBooks SAS and may be reproduced with the prior authorization of the Publisher. In case of reproduction, please cite the source and send copies of the medium used to AutanaBooks, Sector Mitad del Mundo, Quito, Ecuador.

"by the grace of God"

Publisher: Dr. Franyelit Suárez,  
<http://orcid.org/0000-0002-8763-5513>  
editorial@autanabooks.com  
AutanaBooks, Quito, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA  
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Luis Rosales.  
Universidad Nacional Experimental Politécnica  
"Antonino José de Sucre", Vice Rectorado Puerto Ordaz  
luis.rosals2@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-7787-9178>  
Venezuela.

Dr. José García-Arroyo.  
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)  
jagarcia@uees.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0001-9905-1374>  
España

Dr. Valentina Millano.  
<https://orcid.org/0000-0001-6138-4747>.  
millanov@fing.luz.edu.ve , millanov@gmail.com  
Directora. Universidad del Zulia.  
Centro de Estudios de Corrosión (CEC).  
Venezuela.

PhD. Yajaira Lizeth Carrasco Vega  
<https://orcid.org/0000-0003-4337-6684>  
ycarrasco@undc.edu.pe  
Universidad Nacional de Cañete  
Lima, Perú.

Dr. Edwin Flórez Gómez  
<https://orcid.org/0000-0003-4142-3985>  
Universidad de Puerto Rico en Mayagüez  
edwin.florez@upr.edu  
Mayagüez, Puerto Rico

Dr. Hilda Márquez  
<https://orcid.org/0000-0002-7958-420X>  
Universidad Metropolitana de Quito,  
amarquez@umet.edu.ec  
Quito, Ecuador

Dr. Diana Cristina Morales Urrutia  
<https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>  
dc.moralesu@uta.edu.ec  
Universidad Técnica de Ambato  
Ambato, Ecuador

Dr. Hernan Mauricio Quisimain Santamaria  
<https://orcid.org/0000-8491-8326>  
hernanmquisimalin@uta.edu.ec  
Universidad Técnica de Ambato.  
Ambato, Ecuador

DIRECTORY OF THE ATHENEA  
JOURNAL IN ENGINEERING SCIENCES

ACADEMIC COMMITTEE

Dr. Jorge Mauricio Fuentes Fuentes,  
<https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>,  
jmfuentes@uce.edu.ec;  
Universidad Central del Ecuador.  
Quito-Ecuador

Dr. Yelka Martina López Cuadra  
<https://orcid.org/0000-0002-3522-0658>  
ylopez@unibagua.edu.pe  
Universidad Nacional Intercultural Fabiola Salazar Leguía  
de Bagua  
Bagua, Perú

Dra. Irela Perez Magin  
<https://orcid.org/0000-0003-3329-4503>  
iperezmagin@pupr.edu  
Universidad Politécnica de Puerto Rico  
San Juan, Puerto Rico

PhD. Alejandro Suarez-Alvites  
<https://orcid.org/0000-0002-9397-057X>  
alejandrosualvites@hotmail.com  
Universidad Nacional Mayor de San Marcos  
Peru, Lima

Dr. Janio Jadán.  
Universidad Tecnológica Indoamérica,  
Quito, Ecuador.  
janiojadan@uti.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-3616-2074>  
Ecuador

Dr. Neris Ortega  
<https://orcid.org/0000-0001-5643-5925>  
Universidad Metropolitana de Quito,  
Quito, Ecuador  
nortega@umet.edu.ec

Dr. Juan Carlos Alvarado Ibáñez  
<https://orcid.org/0000-0002-6413-3457>  
jalvarado@unibagua.edu.pe  
Universidad Nacional Intercultural Fabiola  
Salazar Leguía de Bagua  
Bagua-Perú

Dr. Angel Gonzalez Lizardo  
<https://orcid.org/0000-0002-0722-1426>  
Polytechnic University of Puerto Rico  
agonzalez@pupr.edu  
Puerto Rico, San Juan

Dr. Wilfredo Fariñas Coronado  
<https://orcid.org/0000-0003-2095-5755>  
Polytechnic University of Puerto Rico  
wfarinascoronado@pupr.edu  
Puerto Rico, San Juan

Dra. Diana Cristina Morales Urrutia  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9693-3192>  
dc.moralesu@uta.edu.ec  
Universidad Técnica de Ambato  
Ambato-Ecuador

Mgt. Juan Segura  
<https://orcid.org/0000-0002-0625-0719>  
juansegura@uti.edu.ec  
Universidad Tecnológica Indoamérica  
Quito, Ecuador

Dr. Jairo José Rondón Contreras  
<https://orcid.org/0000-0002-9738-966X>  
Instituto tecnológico de Santo Domingo  
rondonjjx@gmail.com/ jairo.rondon@intec.edu.do  
República Dominicana

## Content

- 7 Feijoo Calle Ernesto Patricio, Feijoo Guevara Bernardo Andrés, Poma Feicán Paúl Esteban. ***valoración de la resistencia a la compresión de elementos tradicionales usados en mampostería***
- 16 Velez-Cruz, Alex J., Fariñas-Coronado, Wilfredo. ***Review-Bone Characterization: Mechanical Properties Based on Non-Destructive Techniques***
- 30 Lopez Juan, Chela Maiwa, Perez Victor, Vallejo Franco. ***Industria 4.0: reingeniería de la seguridad y salud del trabajador***
- 38 Balladares Paul, Luzuriaga Verónica, Torres Leslie, Castro Vanessa. ***Impactos tecnológicos en el aprovechamiento y uso de la Energía Solar***
- 49 Pirela Ronald, Velásquez Sergio. ***Respuesta natural de los materiales y dispositivos termoeléctricos***

## *Editorial*

*Engineering science is becoming increasingly broad, encompassing applications in health, medicine, the environment, and a diversity of areas that are strengthened by technological tools and new developments in engineering. Athenea journal has carefully selected papers that provide research results that contribute to other fields from an engineering perspective.*

*The new times seem to be very promising for the future of science, and engineering is one of the professional strengths that makes industrial, social and global transformation possible. Thus, engineering sciences continue to be a broad and constantly growing tool, expanding into ever more innovative paths, and creating relevant developments that improve and optimize the living conditions of humanity and its stay on this planet. Hence, engineering represents today a real challenge for the progress of nations and social life.*

*Dr. Franyelit Suárez*



# Valoración de la resistencia a la compresión de elementos tradicionales usados en mampostería

Feijoo Calle Ernesto Patricio  
<https://orcid.org/0000-0001-6901-7933>  
pfeijoo@uazuay.edu.ec  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

Feijoo Guevara Bernardo Andrés  
<https://orcid.org/0000-0002-1089-1332>  
bernardofejoo@uazuay.edu.ec  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

Poma Feicán Paúl Esteban  
<https://orcid.org/0000-0001-9723-7474>  
paulpoma@es.uazuay.edu.ec  
Universidad del Azuay  
Cuenca-Ecuador

Recibido(12/05/2022), Aceptado(05/06/2022)

## Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo caracterizar los elementos típicos usados en mampostería, elaborados en la ciudad de Cuenca (Ecuador), y dicha caracterización fue respecto a la propiedad denominada resistencia a la compresión (RCS). Estas piezas son elaboradas en fábricas artesanales, desde hace mucho tiempo atrás y mantienen una rutina en cuanto al uso de materiales y metodología, su uso es común y generalizado. Los elementos a los que se hace referencia son los denominados adobe, ladrillo y bloque de concreto o cemento. Para valorar la resistencia a la compresión de estos componentes se elaboraron 30 probetas de cada uno de los grupos, probetas con dimensiones aproximadas de 5x5x10 cm., y se sometieron al ensayo respectivo, con el equipo adecuado. Los resultados presentan valores que se deben tomar en consideración y se concluye con observaciones que pueden coadyuvar para el mejoramiento de ciertos aspectos de los elementos estudiados.

**Palabras clave:** adobe, bloque de concreto, construcción, ladrillo.

## Evaluation of the compressive strength of traditional elements used in masonry

### Abstract

The objective of this work was to characterize the typical elements used in masonry, made in the city of Cuenca (Ecuador), and said characterization was related to the property called compressive strength (UCS). These pieces are made in artisan factories, for a long time and maintain a routine in terms of the use of materials and methodology, its use is common and widespread. The elements referred to are those called adobe, brick and concrete or cement block. To assess the compressive strength of these components 30 specimens were made from each of the groups, specimens with approximate dimensions of 5x5x10 cm., and submitted to the respective test, with the appropriate equipment. The results present values that must be taken into consideration and conclude with observations that can contribute to the improvement of certain aspects of the elements studied.

**Keywords:** adobe, concrete block, construction, brick.

## I. INTRODUCCIÓN.

Tradicionalmente en muchas localidades del Ecuador se utilizaron los materiales arcillosos para la elaboración de los denominados adobes, ladrillos y bloques de concreto, y hasta la actualidad se encuentran presentes en casas de diferentes ciudades, lo que ha demostrado, obviamente con permanente mantenimiento, que son un elemento en la mampostería a tomar en consideración. Toda edificación construida, trae consigo la necesidad de garantizar su permanencia en el espacio y en el tiempo, que depende de la capacidad de los materiales estructurales, de la forma como sean empleados y de la afectación medio ambiental a la que se vean sometidos [1].

Autores como Cárdenas y Sarmiento y Ravenna del Águila [2] han desarrollado investigaciones donde es posible evidenciar la congruencia entre los ensayos empíricos y los ensayos técnicos en laboratorio. La investigación mencionada tuvo lugar en la ciudad de Cuenca, Ecuador y consistió en la aplicación de un programa de ensayos que incluían la revisión histórica de obras, la comprensión de las propiedades mecánicas y físicas del material seleccionado, además la comprobación de las normas para conocer las características de resistencia a la compresión como la tracción diagonal y compresión normal.

La elaboración del adobe varía según la localidad, pero la base es arcillas, paja, agua y algunos otros aditivos naturales. Su fabricación se daba generalmente con ciertas características, como elaboración en el sitio de la construcción, fácil obtención de la materia prima ya que es una mezcla de barro, que está compuesta por arcilla y arena mezclada con paja, puesta en moldes y secada al sol, pero esto también varía del clima y se deja secar entre 7 a 17 días [3]. La tierra que se utiliza para hacer los adobes se extrae de los estratos del suelo que están debajo de la llamada "capa orgánica". La tierra con restos de descomposición animal o vegetal puede acarrear problemas en la edificación por su variabilidad y como consecuencia de la posible presencia de semillas, esporas, larvas o huevecillos que, después de un tiempo, se convierten en flora o fauna nociva para los sistemas constructivos. Además, la materia orgánica tiende a descomponerse, con lo que los adobes lógicamente se debilitan [4]. Es de suma importancia conocer la composición del adobe ya que esta depende del lugar de donde se extrae la materia prima, por lo que puede contener diferentes cantidades y tipos de arcillas, limo, arenas y agregados, por ende, la preparación de la mezcla y las características del adobe pueden variar [5].

El adobe generalmente debe tener mayor porcentaje de arena que arcilla. Estos, en su comienzo, eran confeccionados a mano, y luego se utilizaban moldes para lograr una mayor producción. La tierra debe permanecer húmeda durante dos días, para fermentarla y lograr que los aglomerantes actúen. Para elaborar el adobe, el barro se arroja dentro del molde humedecido, luego se comprime con la mano o los pies, repartiendo uniformemente el material; posteriormente se engrasa la superficie, y se desmolda cuidadosamente para que las aristas permanezcan en buen estado [6]. Las arcillas de baja calidad se encuentran disponibles en casi cualquier parte; como resultado de esto, por ejemplo, la manufactura de ladrillos de construcción y de baldosas que no requieran propiedades especiales son de fabricación local, para las cuales la beneficiación intensa de la materia prima no es una prioridad [7].

El ladrillo es una pieza cerámica, su forma por lo general es rectangular obtenida por moldeo, secado y cocción; está conformado por tierras arcillosas. Este elemento es usado en la industria de la construcción por ser de forma regular y fácil manejo [8]. Un bloque de concreto se define como una pieza prefabricada con forma de paralelepípedo, con o sin perforaciones en su interior, elaborada con hormigón simple, conformado por áridos inertes tanto gruesos como finos, cemento hidráulico y agua, con o sin aditivos [9]. El bloque de concreto es un material prefabricado que se utiliza principalmente en la albañilería para construir muros. Al igual que los ladrillos comunes, los bloques funcionan en conjunto al apilarse y al unirse con mortero formado generalmente por cemento, arena y agua. Para llevar a cabo esta unión, los bloques presentan un interior hueco que permite el paso de las barras de acero y el relleno de mortero [10].

A más de lo expuesto, también es muy importante conocer la resistencia a fuerzas que posee el adobe, ladrillo y bloque de concreto, en este caso se los caracterizó mediante pruebas a la compresión, es decir se determinó la resistencia a la compresión simple (RCS) de los 3 elementos. La RCS se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas adquiriendo deformaciones sin llegar a romperse. Se dice que cuando una fuerza actúa sobre un cuerpo, se presentan fuerzas resistentes en las fibras del cuerpo que se denominan fuerzas internas. Fuerza interna es la resistencia interior de un cuerpo a una fuerza externa. Así que cuando se usa el término esfuerzo, se refiere a la magnitud de la fuerza por unidad de área. De tal forma, que la resistencia de un material es la propiedad que tiene para resistir la acción de las fuerzas. El esfuerzo de compresión es una presión que tiende a causar una reducción de volumen [11]. La máquina de ensayos tiene como función comprobar la resistencia de diversos tipos de materiales, para esto posee un sistema que aplica cargas controladas sobre una probeta (modelo de dimensiones preestablecidas) y mide en forma gráfica la deformación, y la carga al momento de su ruptura [12]. Cabe indicar que las muestras de los diferentes materiales y sus propiedades pueden variar según el grado de cementación o variaciones en la composición mineralógica [13].

Este trabajo propone, a partir de la base teórica utilizada para tal fin, la metodología para la obtención de los objetivos propuestos, describiendo un procedimiento claro y estadístico, que puede ser utilizado en otros casos, generando una estrategia para obtener los instrumentos de evaluación adecuados; Cabe recalcar que en este trabajo los resultados obtenidos han generado una expectativa muy importante sobre su aplicación.

## II. METODOLOGÍA

Para la caracterización de estos 3 tipos de elementos, usados en mampostería, se elaboraron 30 probetas para cada uno de los grupos y se las sometieron a los ensayos de carga. Las dimensiones de las probetas fueron de 5x5x10 cm. Las probetas se las puede observar en las figuras 1, 2 y 3. La elaboración de las mismas se desarrollaron con los procedimientos tradicionales utilizados en las fábricas de la ciudad de Cuenca (Ecuador) y en las proporciones que a continuación se detallan. Las muestras de adobe se las realizaron con un 70% de arena y un 30% arcilla, luego este material se lo deja en agua, para poder tener un material moldeable, para finalmente dejar que este material se seque por 20 días. El ladrillo se lo realiza con un porcentaje de 38% de arcilla negra, 35% de arcilla amarilla, 20% de arcilla roja y 7% de agua. Luego se procede a moldear las probetas, secar al aire libre y finalmente se lo quema en el horno tradicional durante 14 horas. Para los bloques se usó chasqui o también denominado pomex, en una cantidad de 45.09%, también contiene 39.86% de polvo, 8 % de cemento y 7.05% de agua, finalmente se lo dejar sacar al aire libre por 30 días.



Fig. 1. Probetas de adobe.



Fig. 2. Probetas de ladrillo.



Fig. 3. Probetas de bloque.



Fig. 4. Equipo Humboldt para ensayos de compresión.

Luego de obtener las diferentes probetas, fueron sometidas al ensayo de carga, mediante un equipo Humboldt, el cual proporciona las garantías para la obtención de la resistencia a la compresión de los elementos sometidos. Este equipo se lo puede observar en la figura 4.

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión se presentan a continuación, en las tablas 1, 2 y 3. Los resultados se muestran en mega pascales.

Como se puede observar en la tabla 1, la resistencia a la compresión simple presenta valores que varían entre 0.09 MPa y 0.87 MPa, con un promedio de 0.51 MPa, una mediana de 0.5 MPa y desviación estándar de 0.22.

Tabla 1. Resultados de la RCS del adobe

| Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) |
|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 1       | 0.75      | 11      | 0.35      | 21      | 0.87      |
| 2       | 0.54      | 12      | 0.62      | 22      | 0.55      |
| 3       | 0.38      | 13      | 0.36      | 23      | 0.86      |
| 4       | 0.26      | 14      | 0.53      | 24      | 0.73      |
| 5       | 0.42      | 15      | 0.48      | 25      | 0.16      |
| 6       | 0.75      | 16      | 0.75      | 26      | 0.46      |
| 7       | 0.45      | 17      | 0.71      | 27      | 0.12      |
| 8       | 0.59      | 18      | 0.87      | 28      | 0.35      |
| 9       | 0.31      | 19      | 0.09      | 29      | 0.49      |
| 10      | 0.33      | 20      | 0.51      | 30      | 0.55      |

El histograma de los resultados para el adobe se los puede observar en la figura 5.

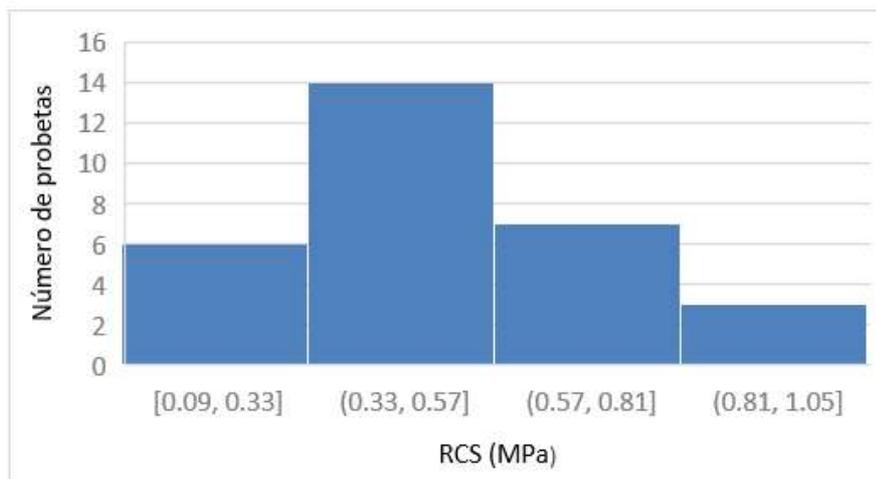


Fig. 5. Histograma de resultados de la RCS del adobe.

Luego de ejecutar la fractura de todas las muestras en el laboratorio, se pudo determinar los siguientes valores de resistencia a la compresión simple del ladrillo. Con un promedio de 3.58 MPa, mediana de 3.66 MPa y desviación estándar de 0.67, los resultados (Tabla 2), muestran una resistencia entre 1.93 MPa y 5 MPa.

Tabla 2. Resultados de la RCS del ladrillo

| Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) |
|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 1       | 3.95      | 11      | 3.73      | 21      | 3.41      |
| 2       | 4.11      | 12      | 5.00      | 22      | 3.84      |
| 3       | 2.53      | 13      | 4.55      | 23      | 3.78      |
| 4       | 4.93      | 14      | 3.10      | 24      | 3.36      |
| 5       | 2.02      | 15      | 3.71      | 25      | 3.41      |
| 6       | 3.19      | 16      | 3.50      | 26      | 4.03      |
| 7       | 1.93      | 17      | 3.82      | 27      | 3.79      |
| 8       | 3.40      | 18      | 3.61      | 28      | 3.70      |
| 9       | 2.82      | 19      | 3.81      | 29      | 3.51      |
| 10      | 3.39      | 20      | 3.50      | 30      | 3.83      |

El histograma de los resultados para el ladrillo se los puede observar en la figura 6.

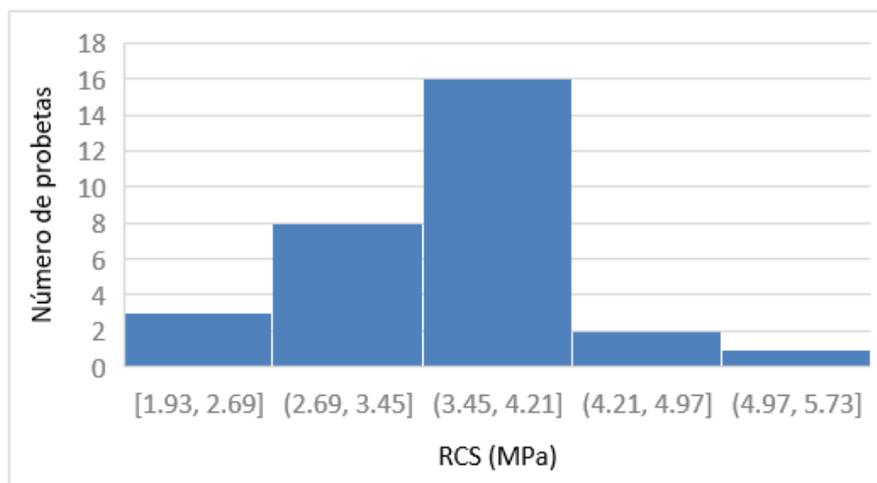


Fig. 6. Histograma de resultados de la RCS del ladrillo.

Finalmente se ejecutaron los ensayos de ruptura para las muestras de bloque, se determinó los siguientes valores de resistencia a la compresión simple, promedio de 7.85 MPa, mediana de 7.94 MPa y desviación estándar de 1.09, los resultados (Tabla 3), muestran una resistencia entre 5.93 MPa y 10.14 MPa.

Tabla 3. Resultados de la RCS del bloque

| Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) | Probeta | RCS (MPa) |
|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 1       | 7.11      | 11      | 6.48      | 21      | 6.20      |
| 2       | 6.74      | 12      | 7.02      | 22      | 8.42      |
| 3       | 7.46      | 13      | 5.93      | 23      | 7.14      |
| 4       | 6.81      | 14      | 8.56      | 24      | 8.92      |
| 5       | 7.69      | 15      | 8.42      | 25      | 8.57      |
| 6       | 9.14      | 16      | 10.14     | 26      | 8.09      |
| 7       | 8.92      | 17      | 9.47      | 27      | 8.69      |
| 8       | 5.96      | 18      | 9.14      | 28      | 8.54      |
| 9       | 6.55      | 19      | 7.79      | 29      | 7.60      |
| 10      | 7.69      | 20      | 8.15      | 30      | 8.11      |

El histograma de los resultados para el bloque se los puede observar en la figura 7.

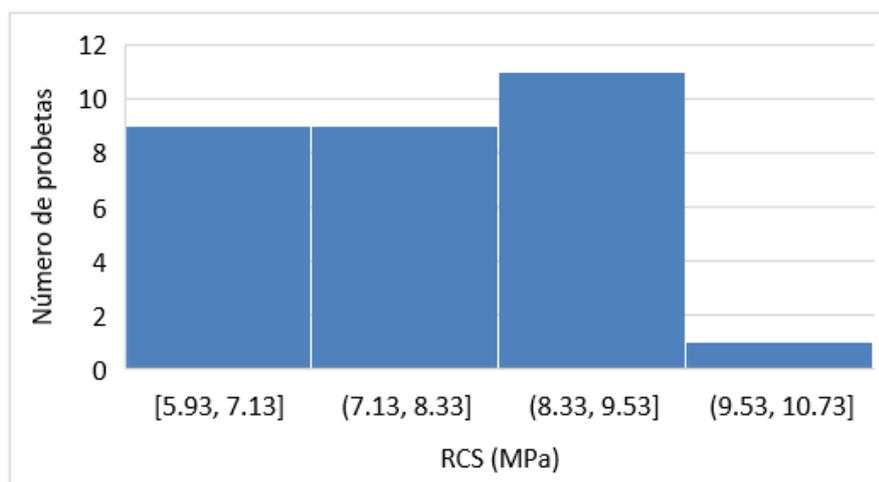


Fig. 7. Histograma de resultados de la RCS del bloque.

Los resultados nos proporcionan acotaciones importantes. La media, mediana y desviación estándar se muestran en la tabla 4. Cabe indicar que los datos del adobe presentan una menor dispersión, pero tienen una baja RCS. La desviación estándar del bloque es alta, pero la RCS de los elementos es muy buena. El ladrillo se mantiene en términos medios.

Tabla 4. Análisis de los valores de los grupos de probetas

|          | Media (MPa) | Mediana (MPa) | Desviación Estándar |
|----------|-------------|---------------|---------------------|
| Adobe    | 0.51        | 0.50          | 0.22                |
| Ladrillo | 3.58        | 3.66          | 0.67                |
| Bloque   | 7.85        | 7.94          | 1.09                |

## CONCLUSIONES

- La metodología planteada nos permite determinar que los elementos evaluados, adobe, ladrillo y bloque, tienen diferentes valores de RCS, los cuales varían desde 0.5 a 7.9 MPa. Específicamente para el adobe podemos concluir que la RCS es de 0.5 MPa, para el ladrillo de 3.6 MPa y para el bloque de concreto 7.9 MPa.
- Estos elementos pueden ser usados para elementos ornamentales, debido a que su resistencia a la compresión simple no es muy alta, pero si mantendrían durabilidad en el tiempo y al mismo tiempo permiten una excelente maniobrabilidad.
- La resistencia a la compresión del adobe es baja, por lo que se debería incluir algún aditivo para mejorarla y elevar su valor al menos a 2 MPa.
- Este trabajo presenta una metodología de trabajo simple y sencilla, para la caracterización de los elementos estudiados, por lo que su puesta a punto debe profundizarse con un mayor número de probetas y de esta forma el proceso sea avalado.

---

**REFERENCIAS**

- [1] J. C. Rivera. "El adobe y otros materiales de sistemas constructivos en tierra cruda: caracterización con fines estructurales". Revista Apuntes, vol. 25, no. 2, pp. 164 – 181, 2012.
- [2] P. Ravenna del Águila. "Características de las viviendas con adobe mejorado de la zona de selva, Morales - San Martín 2020". Tesis de Grado. Universidad Cesar Vallejo. Perú. 2020.
- [3] M. Ríos. "Registro de los sistemas constructivos con fibras naturales en la construcción del cantón Loja – Ensayo y propuesta de un adobe mejorado". Tesis de Grado. Universidad Internacional del Ecuador. Ecuador. 2018.
- [4] L. Guerrero. "Potencial ecológico de la edificación con adobe". Revista Gremium, vol. 1, no. 23, pp. 35, 2014.
- [5] M. Flores, J. Paredes. "Mejora de las características físicas y mecánicas del adobe empleando aditivos naturales de la zona – C.P. Cambio Puente y anexos". Tesis de Grado. Universidad Nacional del Santa. Perú. 2018.
- [6] A. Doria, J. Orozco. "Evaluación de propiedades físico-químicas y mecánicas del adobe elaborado con cal para su uso en la construcción sostenible". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Vol. 1, no. 35, pp. 89 – 94, 2020.
- [7] R. Uribe. "Investigaciones de materias primas minerales no metálicas en el Ecuador". Revista Politécnica, vol. 36, no. 3, pp. 34 – 44, 2015.
- [8] J. Peralta. "Elaboración de ladrillos cerámicos utilizando lodos generados en la planta de tratamiento de agua potable de Tixan en la ciudad de Cuenca". Tesis de Magister. Universidad de Cuenca. Ecuador. 2018.
- [9] W. Santacruz, E. Velastegui. "Determinación de dosificación para elaborar bloques huecos de hormigón que cumplan con la actual norma INEN 3066". Tesis de Grado. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. 2018.
- [10] M. Loyola, J. Valencia. "Elaboración de bloques de construcción en base de relave minero, desechos de obra y cemento portland, para viviendas de interés social". Tesis de Grado. Universidad Laica Vicente Rocafuerte. Ecuador. 2019.
- [11] J. Nureña. "Influencia del estabilizante de cemento y tipos de suelos sobre la resistencia y durabilidad de un adobe constructivo". Trujillo. Universidad Privada del Norte. Perú. 2017.
- [12] P. Feijoo, A. Flores, B. Feijoo, "The Concept of the Granulometric Area and Its Relation with the Resistance to the Simple Compression of Rocks", presentado en la 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Panamá, Panamá, 2019, pp. 52-56, doi: 10.1109/IESTEC46403.2019.00018
- [13] P. Feijoo, J. Padrón. "La Resistividad de Rocas y su Relación con la Resistencia a Compresión Simple en Mina". UCT, vol. 24, n. 99, pp. 61-67. 2020.

---

**LOS AUTORES**

**Patricio Feijoo Calle**, Ingeniero en Minas, graduado en la Universidad del Azuay (Cuenca-Ecuador), con estudios y pasantías en: Bolivia, Brasil, España, Australia en áreas de la geología, geofísica y desarrollo de actividades de explotación de minas. Se encuentra vinculado a la docencia en la Universidad del Azuay.



**Bernardo Feijoo Guevara**, Ingeniero Civil, por la Universidad del Azuay (Cuenca-Ecuador), con estudios y pasantías en: Colombia, Perú, Cuba y Panamá, en áreas de caracterización de materiales y procesos de elaboración de cementos y hormigones. Está vinculado a la docencia e investigación en la Universidad del Azuay.



**Paúl Poma Feican**, Ingeniero de Minas, egresado de la Universidad del Azuay en 2022 (Cuenca-Ecuador). Participante en proyectos de investigación y vinculación de la Escuela de Ingeniería en Minas.

<https://doi.org/10.47460/athenea.v3i10.45>

# Review-Bone Characterization: Mechanical Properties Based on Non- Destructive Techniques

Velez-Cruz, Alex J.  
alvelez@upr.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-9289-5256>  
Polytechnic University of Puerto Rico  
San Juan, PR-USA

Fariñas-Coronado, Wilfredo  
wfarinas@upr.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-2095-5755>  
Polytechnic University of Puerto Rico  
San Juan, PR-USA  
Universidad Nacional Experimental Politecnica  
"Antonio Jose de Sucre"  
Vice-Rectorado, Puerto Ordaz  
Estado Bolívar-Venezuela

Recibido(12/03/2022), Aceptado(05/06/2022)

**Abstract:** This paper characterizes the state of art in the mechanical properties of bone and seeks new avenues aligned with non-invasive characterizations to better fit and produce innovative technologies within the biomedical implant field and early detection of bone diseases. It is concluded that the combination of these methods and non-invasive techniques contributes significantly to obtain the mechanical properties of the bones, which could be extremely useful in the early detection of bone diseases, developing biological models, and performing mechanical analysis with the intent to predict abnormal biological behaviors in human beings.

Keywords: bone, non-Invasive techniques, mechanical properties, biomaterials.

## Caracterización de Huesos: Propiedades Mecánicas Basadas en Técnicas No-Destructivas

**Resumen:** Este artículo caracteriza el estado del arte en las propiedades mecánicas del hueso y busca nuevas avenidas las cuales estén alineadas con caracterizaciones no invasivas para que así se puedan adaptarse mejor y producir tecnologías de vanguardia dentro del campo de implantes biomédicos y detección temprana de enfermedades en los huesos. Se concluye que la combinación de estos métodos y técnicas no invasivas contribuye significativamente a obtener las propiedades mecánicas de los huesos, lo cuales pudieran ser de gran utilidad para la detección temprana de enfermedades óseas, el desarrollo de modelos biológicos y la realización de análisis mecánicos con la intención de predecir comportamientos biológicos anormales en los seres humanos.

**Palabras Clave:** hueso, técnicas no-invasivas, propiedades mecánicas, biomateriales.

## I. INTRODUCTION.

The field of prosthetics operates under largely empirical knowledge. Artificial limbs are expensive, but without a proper fit, these high-tech appendages are worthless—a poorly attached prosthesis is not just uncomfortable and painful, it can also further injure a patient and create another type of problems for their skin and musculoskeletal system discussed on [1]. Today, state-of-the-art prosthetics are mechanical limbs controlled by nerve impulses and microprocessors. While these enhancements can make life easier for amputees, a cutting-edge limb alone will not suffice, they must fit properly. A high-tech limb with an unsecured interface can fall off or cause unnecessary energy loss between a living limb and artificial extension. To ensure a perfect fit, patients need to go for multiple moldings, and they require routine adjustments. But even with all the expense and effort put into a good fit, most of the time limbs are attached with simple suction or skin traction presented on [2]. There are several options that could avoid these types of problems, and in particular, a method that uses biomaterials would allow for tried and validated applications.

Osseointegration, the process of surgically grafting an artificial limb onto a living bone as indicated in [3], ensures the greatest energy transfer and fit between the body and the prosthesis. A limb is attached over two surgeries. During the first procedure, a titanium screw is inserted into the marrow of the residual limb. Several months later, when this screw has become successfully integrated into the bone, doctors add an extension to which the prosthesis will attach.

This process would use engineered materials in its application. The integration of these materials necessitates a way in which the patient can be evaluated non-invasively, and a procedure or plan can be formulated and tailored to the individual. This would require streamlining the process to a few points of data from which the plan for the prosthetic is generated. These consist of the engineering mechanics of bones and joints, the physical characteristics of the patient, the kind of use the prosthetic will have, and the life of the product desired. While some of these details can be answered on a questionnaire, others need to be obtained through observation. An important part of this process is to neither hurt the musculoskeletal nor the skin of the patient, so this necessitates a non-invasive method of collecting data about bones and joints. This would allow us to calculate, using known engineering characteristics of bone, a near as possible perfect implementation of osseointegration.

## II. FIELDS OF INTEREST TO THE SUBJECT

### A. *A Brief Review: Biomaterials*

This review discusses the factors important in the incorporation or integration of biomaterials and devices by tissue. Methods for surface modification and surface-sensitive techniques for analysis are cited. In vitro methods to evaluate the biocompatibility or efficacy of certain biomaterials and devices are presented in [4]. Present and future directions in neural prostheses, cardiovascular materials, blood or bone substitutes, controlled drug delivery, orthopedic prostheses, dental materials, artificial organs, plasma and cytopheresis, and dialysis are discussed in [5], [6].

### B. *Characterization of Bone Material Properties and Microstructure in Osteogenesis Imperfect / Brittle Bone Disease*

Nanoindentation was used to examine the longitudinal elastic modulus and hardness at the material level for mild Osteogenesis Imperfect (OI) type I vs. severe OI type III. Both modulus and hardness were significantly higher (by 7% and 8%, respectively) in mild OI cortical bone compared to the more severe phenotype. Lamellar microstructure also affected these properties, as the younger bone material immediately surrounding osteons showed decreased modulus (13%) and hardness (11%) compared to the older interstitial material seen in [7].

A high-resolution micro-computed tomography system utilizing synchrotron radiation (SR $\mu$ CT) was described and used to analyze the microscale vascular porosity, osteocyte lacunar morphometry, and bone mineral density in OI vs. healthy individuals. Vascular porosity, canal diameter, and osteocyte lacunar density were all two to six times higher in OI cortical bone. Osteocytes were also more spherical in shape.

Finally, three-point bending techniques were used to evaluate the microscale mechanical properties of OI cortical bone in two different orientations. Elastic modulus, flexural yield strength, ultimate strength, and crack-growth toughness were three to six times higher in specimens whose pore structure was primarily oriented parallel vs. perpendicular to the long bone axis. There was also a strong negative correlation between the elevated vascular porosity of OI cortical bone and its elastic modulus, flexural yield strength, and ultimate strength. This relationship was independent of osteocyte lacunar density and tissue mineral density.

In summary, these findings highlight new material and microstructural changes within OI cortical bone that help contribute to its fragility. They also underscore a deep connection between bone structure and mechanical integrity at multiple length scales.

#### *B. Predicting regional variations in trabecular bone mechanical properties within the human proximal tibia using MR imaging*

Recent studies have shown that high-resolution magnetic resonance (MR) imaging allows 3D characterization of bone microstructure. Using MR, whole joint images may be acquired with details of both bone and the surrounding soft tissue. While MR is not able to measure the amount of minerals in the bone as determined in X-ray-based imaging modalities that measure bone mineral density (BMD), it is possible to distinguish between bone and bone marrow to determine bone volume fraction. Correlations between the amount of bone and Young's modulus, yield stress, and ultimate stress have been determined using MR and several other clinical and experimental imaging modalities. Along with the amount of bone, it has been reported that trabecular bone orientation and structure contribute to bone strength based on [8].

#### *C. Bone Characterization using Piezotransducers as Biomedical Sensors*

This technical note explores the possibility of miniaturized piezoelectric ceramic transducers (PZT) patches as biomedical sensors to evaluate the structural dynamic characteristics of bones, by employing them as transmitters and receptors of acoustic waves. The results show that theoretical computations are not very reliable for bone-like materials, but the results, in general, are enough to warrant more study as a method of detecting imperfections such as bone porosity rather than structural characteristics according to [9].

#### *D. Nanomechanical characterization of tissue-engineered on bone grown on titanium alloy in vitro*

In this study, the bone-like mineralized matrix was produced by osteoblasts cultured in vitro on the surface of titanium alloys. The volume of this tissue-engineered bone is so small that the conventional tensile tests or bending tests are implausible. Therefore, nanoindentation techniques that allow the characterization of the test material from the nanoscale to the microscale were adopted. These reveal the apparent elastic modulus and hardness of the calcospherulite crystals (a representative element for woven bone). Nanoindentation with in situ atomic force microscope (AFM) imaging is very useful to identify and characterize the small features in the bone which is not easily achievable by other techniques. The surface topography of sub-regions, heterogeneous microstructure, anisotropy (local grain orientation), and inhomogeneous composition lead to a statistical distribution of the measured Young's modulus and hardness. The average value of Young's modulus is consistent with what is expected for woven bone in a rat. The hardness values are also reasonable for this type of bone. Dynamic mechanical analysis during nanoindentation can determine the viscoelastic properties of this tissue-engineered bone as indicated in [10].

---

#### *F. The Mechanical Properties of Bone*

Comparison of the maximum compressive stress and modulus of elasticity of the rectangular and cubic specimens according to the direction of loading showed that spongy bone is an anisotropic material, i.e., a material that is not equally strong in all directions. Another mechanical property of bone to be considered is its fatigue life. This is especially important about stress, or fatigue fractures debated in [11].

#### *G. Biomechanical Characteristics of the Bone*

A hard material will respond with a minimum deformation to the load increase. When the material fails at the end of the elastic phase, it is considered a fragile material. Glass is an example of a fragile material. The bone is not so hard as glass or metal, and the difference between the materials is that it does not respond linearly, because it cedes and deforms, but not uniformly during the load placement phase. The higher the load imposed on the bone, the higher the deformation. In addition, if the load exceeds the elastic limits of the material, there will be a permanent deformation and failure of the material. If a material continues to over-elongate and over-deform in the plastic phase, it is known as a flexible material. The skin is an example of a material that is deformed considerably before the failure. Bone is a material that has properties that respond in both the fragile and the flexible mode as reported in [12]. This article indicates that the hardness of the bone is a good indicator of its mechanical properties. It also suggests porosity as affecting the hardness of bone, as materials science tells us does with other materials.

#### *H. Bone Mechanics*

The field of bone mechanics has evolved to a very sophisticated level, in which the mechanical properties of cortical and trabecular bone are available for many anatomic sites. Studies have reported on the effects of bone density, aging, and disease on these properties, enabling researchers to perform highly detailed specimen-specific analyses on whole bone and bone-implant systems mentioned in [13]. This article suggests that current methods of measuring porosity (really bone density) would be useful in determining an individual's bone mechanical properties against a standardized set of data.

#### *I. The Material Properties of Human Tibia Cortical Bone in Tension and Compression: Implications for the Tibia Index*

The properties of bone are subjected to a more precise standard of measurement and the difference in precision is found to have yielded no statistically significant difference from other less precise experiments established in [14]. From this we take that observation from a patient can be interpreted from a less invasive test with comparable results to the most invasive test of all, dissection, and preparation for a stress-strain test.

#### *J. Noninvasive Measurements of Bone Mass, Structure, and Strength: Current Methods and Experimental Techniques*

The article presents different types of radiological procedures that would allow for non-invasive measurement of bones that are evaluated to be very promising and in need of validation. Based on [15], the noninvasive techniques used for assessing bone content and density are dual-photon absorptiometry single-photon absorptiometry, dual-energy X-ray absorptiometry, and quantitative computed tomography (QCT) while distinguishing between patients with and without osteoporosis. Extensions of conventional densitometry have been developed by several researchers to include information related to bone mass also are presented. Preliminary studies show the values of these new techniques in the noninvasive measurement of bone structure to estimate the bone strength and assess fracture risk more accurately.

*K. Measurement of abnormal bone composition in vivo using noninvasive Raman spectroscopy*

X-ray-based diagnostic techniques are by far the most widely used for diagnosing bone disorders and diseases, which are largely blind to the protein component of bone. Bone proteins are important because they determine certain mechanical properties of bone and changes in the proteins have been associated with several bone diseases explained in [16]. Spatially Offset Raman Spectroscopy (SORS) is a chemically specific analytical technique that can be used to retrieve information noninvasively from both the mineral and protein phases of the bone material in vivo.

The protein composition of bone is an indicator of porosity thus it could be linked to the strength of the material if compared to an established set of data.

*L. Osseointegration: An Update*

Osseointegration is a complex process between an implant and the bone surrounding it that can be influenced by many factors relating to the surface topography, biocompatibility, and loading conditions all play an important role in osseointegration. The quality of osseointegration is tied to the porosity of the bone and the ability of the implant to exchange active ion sites with the bone. Titanium and its alloys are the materials of choice clinically, because of their excellent biocompatibility and superior mechanical properties as indicated in [17]. The combined effect of surface energy, surface roughness, and topography on the implant determines its ultimate ability to integrate into the surrounding tissue. Surface modification technologies involve preparation with either an additive coating or a subtractive method. Cell migration, adhesion, and proliferation on implant surfaces are important prerequisites to initiate the process of tissue regeneration, while modifications of the implant surface by incorporation of biologic mediators of growth and differentiation may be potentially beneficial in enhancing wound healing following implant placement.

*M. Contact problems with friction, adhesion, and wear in orthopaedic biomechanics. I: General developments*

The bone-implant interface behavior is far from being fully recognized and understood; also, one lacks reliable phenomenological models as it was mentioned in [18]. Along with mentioning the various problems with joint and bone implants, this article mentions the lack of models that can predict the behavior of implants.

*N. Spine Interbody Implants: Material Selection and Modification, Functionalization and Bioactivation of Surfaces to Improve Osseointegration*

Achieving bone integration with an interbody implant is likely to aid fusion and improve implant longevity by limiting subsidence and stress shielding and associated complications. Surface modification and/or conversion of implant surfaces into bioactive areas is intended to improve in-growth and on-growth were discussed in [19]. Along with mentioning the various problems with joint and bone implants, this article underlines the lack of models that can predict the behavior of implants.

*O. Dynamic bone quality-a non-invasive measure of bone's biomechanical property*

Using dual x-ray absorptiometry (DXA), bone mineral density (BMD) is usually measured to detect osteoporosis. Combing this test with a damping factor test is indicative of fractures in one of several places as shown in [20]. This is useful because it indicates a factor that can be accounted for, and modeled for, reducing prosthetic failure by upping the damping factor of the material. The idea that complementing the prosthetic in other places of the body is also interesting and makes sense given that having a stronger material in one place might create a different failure point.

*P. Bone biology, osseointegration, and bone grafting*

The structural integrity of bone may be compromised in times of normal metabolic calcium need and in disease states, thus altering bone structure and mass. This phenomenon can be noted in the bone structure of postmenopausal women, who experience a decrease in estrogen hormones. As bone mass is lost, the interconnections between bone trabeculae also are lost. Because normal interconnections play an important role in making bone a biomechanically rigid structure, this decrease leads to fragility and failure of the bone structure presented in [21]. It is important to note that gender plays a role in the structure, since the absorption rate of calcium is different between men and women, and it is suggested that it is even different between races/ethnicities. Quantifying these differences is important for the model to work.

*Q. Methods for assessing bone quality*

Methods for characterizing bone geometry and microarchitecture include quantitative CT, high-resolution peripheral quantitative CT, high-resolution MRI, and micro-CT. Outcomes include three-dimensional whole-bone geometry, trabecular morphology, and tissue mineral density. The primary advantage is the ability to image non-invasively; disadvantages include the lack of a direct measure of bone strength. Methods for measuring tissue composition include scanning electron microscopy, vibrational spectroscopy, nuclear magnetic resonance imaging, and chemical and physical analytical techniques. Outcomes include mineral density and crystallinity, elemental composition, and collagen crosslink composition. Advantages include the detailed material characterization; disadvantages include the need for a biopsy as discussed in [22].

The article concludes that although no single method can completely characterize bone quality, current noninvasive imaging techniques can be combined with ex-vivo mechanical and compositional techniques to provide a comprehensive understanding of bone quality.

*R. Biomechanical background for a noninvasive assessment of bone strength and muscle-bone interactions*

Bones would not control their mass in order to optimize their strength. They would rather control their architecture to optimize their structural stiffness. No solid structure fails without undergoing some tensile strain at some point. Therefore, the chief skeletal property concerning body-weight bearing is stiffness (i.e., the relationship between the load on a bone and its deformation). A rigid material (mineralized collagen) seems to have developed during evolution for building bones. However, the mechanical efficiency of bones seemed not to depend on the mere accumulation of material but rather on the optimization of its spatial distribution demonstrated in [23]. This contrasts with other articles mentioned here, which list the rate of absorption for minerals as a linear property without regard to its spatial distribution.

*S. Biomechanical consideration in osseointegrated support prostheses*

Biomechanics are of two types: Reactive and Therapeutic. Reactive biomechanics refers to the interaction of isolated biomechanical factors which when combined, produce an accumulative effect and therapeutic refers to the clinical process of altering each biomechanical factor to reduce the cumulative response causing implant overload and failure as revealed in [24]. Biomechanical failures do occur due to deficient knowledge of the forces the implant would be subjected to. Hence it is always necessary for the team professionals to have a thorough knowledge of the basic principles of biomechanics and plan the treatment accordingly. This reinforces the need to pre-plan and therapeutically alter the biomechanics to help osseointegration.

*T. Muscle Strength and Bone Mineral Density in mine victims with transtibial amputation*

Local muscle strength and muscle contractions are important factors for local bone mineral density and these factors need to be paid more attention to in amputee patients. Bone mineral density and muscle strength are lower on the amputated side than on the sound side and local bone loss is related to the loss of muscle strength in transtibial amputees shown in [25]. This article is important because it highlights the need to account for the muscle density of the patient.

*U. Revolutionizing Prosthetics: Extreme Trans-disciplinary Systems Engineering*

An overview of a Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) project that created an advanced upper-limb prosthetics. They importantly concluded that when it comes to choosing to implement such a procedure on a person, that one size (or in this case prosthetic) does not fit all and that it must be tailored to use, biology, cost, and expectations. Each approach had risks and rewards, and ultimately the choice should be made by the patient and his/her clinician. As a result, a multimodal neural integration framework should be designed to use one or more approaches in synergy with each other as discussed in [26].

*V. Noninvasive imaging of bone microarchitecture*

High-resolution peripheral quantitative computed tomography (HR-pQCT) imaging requires a dedicated extremity scanner. Using HR-pQCT, measures of three-dimensional (3D) bone geometry, overall and compartment-specific bone density, and bone microarchitecture can be acquired within a scan time of 3 minutes. Cross-sectional HR-pQCT studies have also provided insight into the age, race, and gender-specific aspects of bone quality. Asian men and women have smaller bones; thus BMD, as measured by DXA, tends to underestimate their real bone density. Nevertheless, Asians sustain fewer fractures. Using HR-pQCT, it was found that despite the relatively low total bone area, premenopausal Asian women displayed significantly thicker cortices and a richer trabecular microarchitecture than Caucasians. The finite elements (FE) analyses yielded higher estimates of bone stiffness/strength. Menopause diminishes some of these microstructural advantages, but significant racial differences remain detectable according to [27].

This study solidifies HR-pQCT as a good candidate for use in procedure since it yields the most information from one test, and it furthers the idea introduced by [21] that race plays a role in bone density.

*W. Noninvasive evaluation of bone micro-architecture and strength*

Noninvasive imaging techniques, including quantitative computed tomography (QCT), high-resolution peripheral QCT (HR-pQCT), and magnetic resonance imaging (MRI) allow for the assessment of bone microarchitecture and strength, which are thought to underlie fracture risk. The researcher concentrated on the potential clinical utility of these techniques to enhance understanding of the skeletal changes that occur during growth and aging, differences between male and female skeletons, the assessment of the response to drug therapies, and the identification of patients at risk of fracture. At least in those first three areas, the new imaging systems appear poised to serve as invaluable research tools that ultimately may offer an understanding of fracture mechanisms far beyond what DXA can provide. However, they are unlikely to supplant DXA any time soon in the realm of fracture risk prediction.

This is because 'While more work is needed looking at other sites, like the spine, in general, these biomechanical findings fit with the growing epidemiological data suggesting that DXA works regardless of gender, in part because it's so influenced by bone size as shown in [28]. There is also the consideration that these other imaging tools are much more specialized and finicky to research with, as the same machine must be used through the whole process and the setup must be the same every time, a detail that according to the author's opinion is enough to discard them entirely.

#### X. Osseointegration amputation prostheses on the upper limbs: methods, prosthetics, and rehabilitation

Traditional prosthetic socket and suspension technology often fail to meet both cosmetic and functional requirements, which can severely impair quality of life. With direct bone anchorage, the prosthesis is attached to the residual limb without the use of a socket. The method is based on the principle of osseointegration, which has been in clinical use for tooth and maxillofacial replacements since 1965 as described by [3].

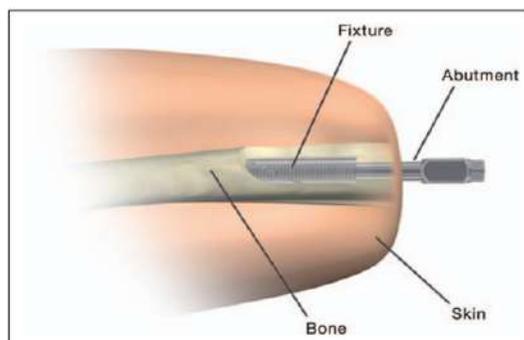


Fig. 1. Implant System-The implant system incorporates three main components: a threaded titanium implant (the fixture), a skin-penetrating cylindrical implant (the abutment), and a titanium screw (the abutment screw) which holds the system together [29].

*This article gives a good overview of osseointegration and gives suggestive data about possible problems with implementation, but the big takeaway here is that careful consideration of implementation yields the best results.*

#### Y. Skeletal Scintigraphy (Bone Scan)

*Measures bone elasticity, the structure of trabecular, and apparent density. The common site of measurement is the non-dominant calcaneus, which a laterally projecting piezoelectric transducer transmits US energy toward a receiving transducer. The material determines the velocity and degree of penetration of the sound waves. Greater penetration (less attenuation) and lower velocity are possible with more porous bone (slower wave). The calcaneus has several advantages as a QUS measurement site: it can be viewed via two almost plane-parallel surfaces; it is primarily made up of trabecular bone, which is more metabolically active than cortical bone; the soft tissue above it is thin, and it is a weight-bearing bone. The broadband ultrasonic attenuation (BUA, m/s), ultrasound velocity (speed of sound—SOS, dB/MHz), and a computed stiffness index based on the product of BUA and SOS modified by three distinct constants are commonly used to measure composite bone qualities as indicated in [30]. QUS devices are small, portable, and relatively inexpensive and operator training. Can be performed quickly and without exposure to ionizing radiation.*

#### Z. Resonant Ultrasound Spectroscopy: theory and application

*In various musculoskeletal diseases and diagnostic orthopedic medicine, bone scintigraphy is one of the most utilized diagnostic procedures to study bone lesions and metastases. Later advancements, such as single-photon emission computed tomography (SPECT) and positron emission tomography (PET), have made it possible to acquire whole-body scans of the whole skeleton. They improve lesion detection sensitivity and, more critically, allow for 3D localization of radiation generated by radionuclide imaging agents or biomarkers, with detection sensitivity down to nano- or picomolar concentrations. The expansion of clinical nuclear imaging applications has resulted in the creation of a dedicated small animal imaging system presented in [31]. In osteoarthritis, alterations in bone turnover and cartilage composition can be detected. Micro-SPECT/micro-CT co-imaging can detect high uptake of Tc-99 m MDP, imaging areas with high bone turnover, such as joints (knees, shoulders), spine, and skull.*

#### AA. *Resonant Ultrasound Spectroscopy*

Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) is an elegant strategy for measuring the total elastic tensor of a fabric. The scheme utilizes the reality that the mechanical vibration resonance range depends on the geometry, mass density, and elastic tensor of the test. RUS to utilize these conditions to gather flexible properties or shape parameters of tests from a suite of measured resonance frequencies as demonstrated by [32]. To perform a reversal, we must have a way of anticipating these frequencies for an arbitrary elastic body. Normal modes of elastic substances are used in Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) to determine material properties such as elastic moduli. In theory, a single measurement could be used to infer the entire elastic tensor. RUS bridges the experimental gap between low-frequency stress-strain methods (quasi-static up to a few kHz) and ultrasonic time-delay methods for centimeter-sized samples (hundreds of kHz to GHz).

#### BB. *Imaging-Based Methods for Non-invasive Assessment of Bone Properties Influenced by Mechanical Loading*

Skeletal scintigraphy makes a difference to diagnose and evaluate an assortment of bone diseases and conditions utilizing little sums of radioactive materials called radiotracers that are infused into the circulation system. The radiotracer voyages through the zone being inspected and gives off radiation within the shape of gamma beams which are identified by an uncommon gamma camera and a computer to form pictures of your bones as mentioned in [33]. Since it can pinpoint atomic movement inside the body, skeletal scintigraphy offers the potential to recognize illness in its most punctual stages. The common uses of the bone scan are to help determine the location of an abnormal bone in complex bone structures, such as the foot or spine. diagnose broken bones, such as a stress fracture or a hip fracture, not clearly seen on x-rays, and find bone damage caused by infection or other conditions.

#### CC. *Imaging Technologies for Preclinical Models of Bone and Joint Disorders*

Investigative devices are being created to build computer-based 3D geometric models of bone inferred from serial transaxial whole-body QCT, HR-pQCT, and HR-MRI imaging utilizing FEA. Whole-body QCT pictures are post-processed utilizing a commercially accessible program to create 1 to 3 mm bone voxels, which are changed over into similarly measured “finite elements”—each relegated homogeneous fabric flexible properties agent of human cortical or trabecular bone as explained in [34]. Additionally,  $\mu$ FEA models can be built from HR-pQCT and HR-MRI filters of peripheral skeletal sites at an indeed higher ostensible determination to supplying a point-by-point representation of the microstructure.

“Virtual” loads (i.e., to recreate powers related with compression, bowing, single-leg position, or sideways drop) are connected to a volumetric locale intrigued to foresee fabric properties such as flexible modulus, stresses, disappointment stack, and rate of stack carried by distinctive bone locales.

### III. METHODOLOGY

During this review, which is related to obtaining mechanical properties from non-invasive techniques, the focus of this literature review was carried out taking into consideration scientific articles and theses, publications in physical and digital format and presentations at conferences provided by authors, librarians, and scientific entities.

In addition, American and European databases were searched, including the repositories of academic institutions specialized in the field of biomedical engineering. Finally, a little information was obtained from sources such as engineering textbooks, technical manuals, medicine and engineering handbooks, the internet, and review articles.

Originally, an exhaustive search was carried out in the main database of the Polytechnic University of Puerto Rico, obtaining fifty-five (55) articles related to the topic above, filtering the publication periods from ranges between 2000 to 2022. Among the most common search and databases used for this review are "PubMed", "Scopus", "IEEE", "EBSCO", "Google Scholar" and "Science Direct", among others.

However, only thirty-five (35) articles were selected since they showed a strong correlation with the main purpose of the review. The twenty (20) rejected articles were evaluated to determine which of these would meet the inclusion or exclusion criteria. For each criterion, several elements were created that helped either to accept or reject the articles to be included in this review, including the technical knowledge and characteristics of the intended topic (See table 1 below).

Table 1. Inclusion and Exclusion Criteria

| Criteria  |   |
|---|---|
| Inclusion   | Exclusion   |
| Info related to bone evaluation.                          | Articles with no relevant technical info on the subject.  |
| Info related to non-invasive techniques for bones.        | Articles, thesis, proceedings, etc. with no info related to obtaining bone properties based on non-invasive techniques or images. |
| Info related to mechanical properties of the bone.        |   |
| Info related to new techniques to obtain bone properties. |   |
| Recent info related to bone properties assessments.       |   |

The keywords used within the revision of this article were as follows:

- "Mechanical Properties" and "Non-Invasive Techniques"
- "Stress-Strain Relationship" and "Non-Destructive Techniques"
- "Bone Characterization" and "Bone Diagnosis"
- "Young Modulus" and "Cortical Bone"
- "Mechanical properties correlation" and "Images"
- "Bone Mineral Content (BMC) Evaluation" and "Bone Mineral Density (BMD) Evaluation"

#### IV. RESULTS

Table 2. Most Relevant Papers to Obtain Mechanical Properties Based on Non-Invasive Techniques.

| Ref. | Paper Title   | Property   | Technique  | Strengths / Weaknesses   |
|------|---|--|--|--|
| [7]  | B. Characterization of Bone Material Properties and Microstructure in Osteogenesis Imperfect/Brittle Bone Disease           | Young's modulus (E) and hardness   | Nanoindentation  | Determine longitudinal young modulus for mild Osteogenesis Imperfecta.   |
| [8]  | C. Predicting regional variations in trabecular bone mechanical properties within the human proximal tibia using MR imaging | Young's modulus (E), yield stress ( $\sigma_y$ ), and ultimate stress ( $\sigma_{ult}$ ) | High-resolution magnetic resonance image (MRI)                   | Determine bone volume fraction. The MR is capable to correlate between (E), ( $\sigma_y$ ), and ( $\sigma_{ult}$ ). MR is not able to measure BMD.                   |
| [10] | E. Nanomechanical characterization of tissue-engineered on bone grown on titanium alloy in vitro                            | Young's modulus (E) and hardness   | Combination of Nanoindentation and Atomic Force Microscope (AFM) | Helps to characterize the small features in bone such as surface topography of sub-regions, heterogeneous microstructure, anisotropy, and inhomogeneous composition. |

|      |  |  |   |  |
|------|--|--|---|--|
| [15] | J. Noninvasive Measurements of Bone Mass, Structure, and Strength: Current Methods and Experimental Techniques | Bone mineral content and bone mineral density                                | Dual-photon absorptiometry, single-photon absorptiometry, dual energy X-ray absorptiometry, and quantitative computed tomography                              | Distinguish between patients with and without osteoporosis.  |
| [16] | K. Measurement of abnormal bone composition in vivo using noninvasive Raman spectroscopy                       | Porosity   | Spatially Offset Raman Spectroscopy   | Retrieve info noninvasively from both the mineral and proteins of the bone.  |
| [20] | O. Dynamic bone quality-a non-invasive measure of bone's biomechanical property                                | Bone mineral density (BMD)   | Using dual x-ray absorptiometry (DXA)   | Used to measure and detect osteoporosis.   |
| [22] | Q. Methods for assessing bone quality  | Microstructure and Microarchitecture   | Quantitative CT, high-resolution peripheral quantitative CT, high-resolution MRI, and micro-CT.   | Provide bone geometry and microarchitecture. Includes 3D bone geometry, trabecular morphology, and tissue mineral density.                           |
| [27] | V. Noninvasive imaging of bone microarchitecture   | Bone Mineral Density and microarchitecture                                   | High-resolution peripheral quantitative computed tomography (HR-pQCT)   | Obtain 3D bone geometry, overall and compartment-specific bone mineral density, and bone microarchitecture.  |
| [28] | W. Noninvasive evaluation of bone micro-architecture and strength  | Microarchitecture, strength, fracture, and bone mineral density (BMD)        | Quantitative computed tomography (QCT), high-resolution peripheral QCT (HR-pQCT), magnetic resonance imaging (MRI) and Dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) | The QCT, HRpQCT and MRI allow for the assessment of bone microarchitecture and strength. DXA help to predict bone fracture.                          |
| [30] | Y. Skeletal Scintigraphy (Bone Scan)   | Young's Modulus, microarchitecture of trabecular bone, and apparent density. | Skeletal Scintigraphy   | Bone scintigraphy is one of the most utilized diagnostic procedures to study bone lesions and metastases.  |
| [31] | AA. Resonant Ultrasound Spectroscopy   | Young's Modulus  | Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS)  | The scheme utilizes the reality that the mechanical vibration resonance range depends on the geometry, mass density, and elastic tensor of the test. |

## CONCLUSIONS

It has been noticed that exists a gap of knowledge regarding the non-invasive evaluation of bones to determine their mechanical properties. There is a lack of non-invasive standards and their associated availability in the market, which makes difficult the evaluation concerns prosthetic and medical device fitting. Also, it can be concluded that non-invasive techniques are extremely useful when evaluations of bone diseases are needed. The bone diseases such as osteogenesis imperfecta, osteoporosis, and micro-fractures can be predicted in advance with these types of non-invasive techniques. Based on the above review, one of the most

promising non-invasive techniques is the one related to the evaluation of the porosity of bone, which shows a significant connection with medical practices and their current challenges. Even this practice is in dispute, for example, [23] suggests that the rate of absorption and accumulation of minerals is not a linear relationship but that it does accumulate in a pattern that suggests that the body accumulates favoring stiffness rather than strength or flexibility. This is in contrast with most other relevant articles listed here that state that accumulation leads to hardness and absent that, osteopenia occurs (low bone mineral density).

There is also the notion that different regions of the body contain different kinds of bone and was observed that each of these bones has a different hardness and modulus. Besides that, it was noticed that the cancellous bone in the tibia was approximately half as hard as the thigh bone according to [35].

A mathematical or engineered model does not yet exist that joins this knowledge with a mechanic evaluation of materials. In addition, aggregating this validated knowledge to new emerging biomaterials would better address current shortfalls of osseointegration, bone remodeling, and their associated mechanical characteristics and properties and would synergistically improve our insights into prosthetic/orthopedics applications.

## ACKNOWLEDGMENT

I want to thank the library and public services personnel of the Polytechnic University of Puerto Rico to support me in finding some of the articles through an interlibrary loan agreement with other libraries around the world. Also, the UNEXPO, Puerto Ordaz for their constant support and guidance throughout these years.

## REFERENCES

- [1] J. E. Uellendahl, "Barriers to Clinical Application: A Prosthetist's View," *Journal of Prosthetics and Orthotics*, vol. 18, p. 123, 2006.
- [2] J. Foort, "Modular prosthetics-a philosophical view\*," *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 3, November 1978.
- [3] S. Jonsson, K. Caine-Winterberger and R. Branemark, "Osseointegration amputation prostheses on the upper limbs: methods, prosthetics and rehabilitation," *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 35, no. 2, pp. 1990-200, January 2011.
- [4] A. B. Wilson, "Lower-limb modular prostheses: a status report," *Orthotics and Prosthetics*, vol. 29, no. 1, pp. 23-32, 1975.
- [5] B. Resnick, "The Problem With Modern-Day, High-Tech Prosthetics," *Popular Mechanics*, March 2010. [Online]. Available: <http://www.popularmechanics.com/science/health/a6302/high-tech-prosthetics-fitting/>. [Accessed January 2016].
- [6] A. Tathe, M. Ghodke and A. P. Nikalje, "A brief review: biomaterials and their application," *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, vol. 2, no. 4, pp. 19-23, 2011.
- [7] J. R. Jameson, "Characterization of bone material properties and microstructure in osteogenesis imperfecta/brittle bone disease," Marquette University, Milwaukee, 2014.
- [8] S. L. Lancianese, E. Kwok, C. A. Beck and A. L. Lemer, "Predicting regional variations in trabecular bone mechanical properties within the human proximal tibia using MR imagining," *Bone*, vol. 43, no. 6, pp. 1039-1046, 2008.
- [9] S. Bhalla and S. Bajaj, "Bone characterization using piezotransducers as biomedical sensors," *Strain*, vol. 44, no. 6, pp. 475-478, 2008.
- [10] J. Chen, M. A. Birch and S. J. Bull, "Nanomechanical characterization of tissue-engineered bone grown on titanium alloy in vitro," *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, vol. 21, no. 1, pp. 277-282, 2009.
- [11] F. G. Evans, "Mechanical properties of bone," *Artificial Limbs*, vol. 13, no. 1, pp. 37-48, 1973.
- [12] A. D. P. Bankoff, "Biomechanical characteristics of the bone," in *Human Musculoskeletal Biomechanics*, London, IntechOpen, 2012, pp. 61-86.
- [13] M. Kutz, T. M. Keaveny, E. F. Morgan and O. C. Yeh, "Chapter 8," in *Standard handbook of biomedical engineering and design*, New York, McGraw-Hill, 2003.
- [14] A. Kemper, C. McNally, E. Kennedy, S. Manoogian and S. Duma, "The material properties of human tibia cortical bone in tension and compression: implications for the tibia index," Virginia Tech – Wake Forest, Center for Injury Biomechanics, Blacksburg, 2007.

- [15] K. G. Faulkner, C. C. Glüer, S. Majumdar, P. Lang, K. Engelke and H. K. Genant, "Noninvasive measurements of bone mass, structure, and strength: current methods and experimental techniques," *American Journal of Roentgenology*, vol. 157, no. 6, pp. 1229-1237, 1991.
- [16] K. Buckley, J. Kerns, P. D. D. Gikas, H. L. Birch, R. Keen, A. W. Parker, P. Matousek and A. E. Goodship, "Measurement of abnormal bone composition in vivo using noninvasive Raman spectroscopy," *IBMS Bonekey*, vol. 11, no. 602, 2014.
- [17] S. Parithimarkalaignan and T. V. Padmanabhan, "Osseointegration: an update," *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, vol. 13, no. 1, pp. 2-6, November 2013.
- [18] J. Rojek and J. J. Telega, "Contact problems with friction, adhesion and wear in orthopaedic biomechanics," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 3, no. 39, January 2001.
- [19] P. J. Rao, M. H. Pelletier, W. R. Walsh and R. J. Mobbs, "spine interbody implants: material Selection and modification, functionalization and bioactivation of surfaces to improve osseointegration," *Orthopaedic Surgery*, vol. 6, no. 2, pp. 81-89, 2014.
- [20] A. Bhattacharya, N. B. Watts, K. Davis, S. Kotowski and R. Shukla, "Dynamic bone quality-a non-invasive measure of bone's biomechanical property," *Journal of Clinical Densitometry*, vol. 11, no. 3, pp. 449-450, 2008.
- [21] A. K. Garg, "Bone Biology, Osseointegration, and Bone Grafting," in *Implant Dentistry. A Practical Approach*, Oxford, Mosby Elsevier, 2010, pp. 193-211.
- [22] E. Donnelly, "Methods for Assessing Bone Quality: A Review," *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 469, no. 8, pp. 2128-2138, 2010.
- [23] G. R. Cointry, R. F. Capozza, A. L. Negri, E. J. A. Roldan and J. L. Ferreti, "Biomechanical background for a noninvasive assessment of bone strength and muscle-bone interactions," *J Musculoskel Neuron Interact*, vol. 4, no. 1, pp. 1-11, 2003.
- [24] H. Alva, K. Prasad and A. Prasad, "Biomechanical considerations in osseointegrated support prosthesis," *Live Dental*, [Online]. Available: <https://livedental.in/articles/implantology/146-biomechanical-considerations-in-osseointegrated-supported-prosthesis>.
- [25] I. Tugcu, I. Safaz, B. Yilmaz, A. S. Goktepe, M. A. Taskaynatan and K. Yazicioglu, "Muscle strength and bone mineral density in mine victims with transtibial amputation," *Prosthetics and Orthotics International*, vol. 33, no. 4, pp. 299-306, 2009.
- [26] J. Burck and J. Bigelow, "Revolutionizing Prosthetics: Extreme Transdisciplinary Systems Engineering," *Insight*, vol. 13, no. 4, pp. 25-28, 2010.
- [27] J. M. Patsch, A. J. Burghardt, G. Kazakia and S. Majumdar, "Noninvasive imaging of bone microarchitecture," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1240, no. 1, pp. 77-87, 2011.
- [28] N. A. Andrews, "Noninvasive evaluation of bone microarchitecture and strength: better than DXA?," *IBMS Bonekey*, vol. 9, 2012.
- [29] "Glossary of Orthotic & Prosthetic Terms," *West Coast Brace and Limb*, [Online]. Available: <http://www.wcbl.com/op-resources-2/glossary-of-terms/>.
- [30] Radiological Society of North America, "Skeletal Scintigraphy (Bone Scan)," *RadiologyInfo.org*, 15 June 2020. [Online]. Available: <https://www.radiologyinfo.org/en/info/bone-scan>. [Accessed 25 January 2022].
- [31] B. J. Zadler, J. H. L. Le Rousseau, J. A. Scales and M. L. Smith, "Resonant Ultrasound Spectroscopy: theory and application," *Geophysical Journal International*, vol. 156, no. 1, pp. 154-169, 2004.
- [32] J. R. Gladden, "Resonant Ultrasound Spectroscopy," *Joseph R. Gladden*, 2007. [Online]. Available: <http://www.phy.olemiss.edu/~jrgladden/rus/>.
- [33] N. J. MacIntyre and A. L. Lorbergs, "Imaging-Based Methods for Non-invasive Assessment of Bone Properties Influenced by Mechanical Loading," *Physiotherapy Canada*, vol. 64, no. 2, pp. 202-215, 2012.
- [34] J. L. Tremoleda, M. Khalil, L. L. Gompels, M. Wylezinska-Arridge, T. Vincent and W. Gsell, "Imaging technologies for preclinical models of bone and joint disorders," *EJNMMI Research*, vol. 1, no. 11, pp. 1-14, 2011.
- [35] V. Vijayakumar, "Quantifying the regional variations in the mechanical properties of cancellous bone of the tibia using indentation testing and CT imaging," *McMaster University*, Hamilton, 2013.

---

**AUTHORS**

**Alex J. Vélez-Cruz**, is an engineering doctoral student and mechanical engineer who was born and raised in Puerto Rico (PR). He is a faculty member of the BME Department at Polytechnic University of PR and is a young passionate researcher and an inventor that work constantly in the product development area with the intent to serve and help people in need.



**Wilfredo Fariñas Coronado** is a PhD in Technical Sciences, specialized in the diagnosis of breast cancer. He is the Head Department Director of the Biomedical Engineering Department at the Polytechnic University of Puerto Rico and a senior researcher dedicated to advancing and promoting technologies for the early detection of cancer.

<https://doi.org/10.47460/athenea.v3i10.46>

# Industria 4.0: reingeniería de la seguridad y salud del trabajador

Lopez Juan

<https://orcid.org/0000-0001-7783-8686>

dr.juanlopez88@outlook.com

Universidad Católica de Cuenca

Carrera de Medicina

Cuenca-Ecuador

Perez Victor

<https://orcid.org/0000-0002-7176-4038>

vic\_per2302@hotmail.com

Gamma Salud

Área de Medicina General-Salud Ocupacional

Ambato-Ecuador

Chela Maiwa

<http://orcid.org/0000-0003-0651-8751>

maiwa\_94@hotmail.com

Escuela Superior Politécnica del Chimborazo

Facultad de Salud Pública

Carrera de Medicina

Riobamba-Ecuador

Vallejo Franco

<http://orcid.org/0000-0002-7010-67167>

ferv2210@hotmail.com

Hospital Dr. Rafael Rodríguez Zambrano

Área de Salud Ocupacional

Manta-Ecuador

Recibido (23/07/2022), Aceptado(30/10/2022)

**Resumen:**

En este documento se presenta una descripción de los retos que se avizoran con la incorporación y adopción de las tecnologías de la Industria 4.0. Se realizó una revisión sistemática considerando artículos científicos de bases científicas relacionadas con el ámbito de la salud y seguridad ocupacional a partir de cuya información se hallaron múltiples factores que contribuyen un reto a resolver para los responsables del bienestar de los trabajadores en las industrias. El uso de la tecnología, su dependencia, su necesidad y otros aspectos relacionados con la adicción al uso de la tecnología están contribuyendo a riesgos en la seguridad y salud ocupacional de carácter sicosocial con implicaciones directas sobre el desempeño de la organización, por lo cual debe reestructurarse los planes de riesgos ocupacionales considerando estos nuevos retos.

**Palabras clave:** salud ocupacional, seguridad ocupacional, industria 4.0.

Industry 4.0: reengineering of worker health and safety

**Abstract:**

This document describes the challenges associated with the integration and implementation of Industry 4.0 technologies. A systematic review was carried out, considering scientific articles in the field of occupational safety and health. Several factors were found to contribute to a challenge to be resolved for those responsible for the well-being of workers in the industry. The use of technology, its dependence, its needs and other aspects related to the dependence on the use of technology contribute to occupational safety and health risks that are psychosocial in nature and have a direct impact on the performance of the company, so that workplace risk plans must be restructured taking into account these new challenges.

**keywords:** occupational health, occupational safety, industry 4.0

## I. INTRODUCCIÓN.

El lugar de trabajo ha cambiado drásticamente con la llegada de la Industria 4.0. Con esta transformación, tanto el entorno físico como el laboral han ido cambiando rápidamente y las empresas están tratando de aumentar su productividad a través de prácticas como la automatización. En muchos casos, eso obliga a los trabajadores a competir con las máquinas, lo que lleva a la pérdida de puestos de trabajo [1].

Si bien puede parecer una revolución en la tecnología, este proceso se basa en la automatización que se basa en que los trabajadores sean reemplazados eventualmente por máquinas o algoritmos; las ocupaciones que podrían considerarse potencialmente peligrosas cuando están automatizadas presentan riesgos posiblemente más altos de problemas de seguridad de salud ocupacional cuando la maquinaria autónoma se vuelve cada vez más popular. En tales casos, la intervención de salud ocupacional puede ser efectiva o no dependiendo de la filosofía de una organización en materia de seguridad ocupacional. En un proceso de fabricación digital, las cosas se desarrollan a través de la entrada de datos de las máquinas y la robótica avanzada. En este proceso de desarrollo, la seguridad y la salud y seguridad en el trabajo pueden ser un problema [2].

En una organización donde las tareas de un trabajador son realizadas por robots o tecnologías basadas en la automatización, los riesgos laborales deben monitorearse y evaluarse de cerca en lugar de verse interrumpidos por las tecnologías digitales que avanzan en la industria. Al igual que los accidentes industriales, la OSH se está volviendo cada vez más común en la nueva era de las máquinas de IA, ya que asumen las tareas tradicionales de los humanos. Estos son tipos únicos que provienen del diseño CAD de productos utilizados en industrias: productos de diseño asistido por computadora (CAD), como impresoras 3D que crean productos para laboratorios o fabricantes de artículos, requieren que los usuarios manejen materiales flexibles durante la fase de producción. El enfoque de Industria 4.0 está en la fabricación distribuida y los modelos comerciales innovadores. Esto ejerce un estrés excesivo sobre los trabajadores, lo que resulta en una mayor tasa de lesiones musculoesqueléticas [1].

En este trabajo se describe en la sección del desarrollo, múltiples casos en los que se presentan nuevas posibilidades para el control y monitoreo de la salud y seguridad del trabajador, en la sección de metodología se especifica el proceso de obtención de la información de referencia para este trabajo, en la sección de Resultados se explican y discuten algunos hallazgos y sus enfoques, finalmente, se presentan las conclusiones.

## II. DESARROLLO

Una revisión bibliométrica realizada sobre los artículos relacionados con la temática de Salud y Seguridad Ocupacional en la Industria 4.0 se presenta en la figura 1 en la cual se destacan algunos aspectos recurrentes y más estudiados en torno a la edad y género de los trabajadores. Los riesgos de SST se han investigado desde una perspectiva general identificándose en estudios: lesiones en los dedos y las manos, la percepción y dependencia de los usuarios hacia el uso de dispositivos portátiles, consideraciones ergonómicas y fisiológicas, la comodidad de los dispositivos portátiles, limitaciones con respecto al tamaño de la mano, facilidad de uso y tensión potencial [3]. Se han estudiado riesgos operativos como la descarga eléctrica de dispositivos inalámbricos, la obstrucción de los sentidos de los trabajadores, el aumento del tiempo de ciclos de trabajo y el número de errores y la causa de defectos debidos a una retroalimentación incorrecta. La forma en que se aborda la seguridad laboral ha cambiado a lo largo de los siglos y alcanzará posiblemente su punto máximo en la Industria 4.0. Hay indicios de una complejidad creciente para abordar este problema del que se han debatido los pros y los contras, la tecnología puede ofrecer soluciones a los problemas de seguridad, por ejemplo, la realidad virtual y aumentada son una alternativa para la Industria 4.0[4].



Los trabajadores temen la pérdida de empleos debido a la automatización y los robots. Sin embargo, también se pueden utilizar para que los trabajos que la gente haría tradicionalmente se hagan más flexibles, más seguros y porque la inteligencia artificial requiere menos espacio para trabajar, lo que es bueno para la sociedad en su conjunto. Por otro lado, los trabajadores ahora pueden participar en tareas más complejas que implican la toma de decisiones, la responsabilidad y la gestión, así como cierta interacción hombre-máquina. Esto los expone a riesgos de salud y seguridad relacionados con el uso de herramientas automatizadas [1]. Los profesionales de la salud ocupacional, que son responsables de garantizar la seguridad de los empleados, deben evaluar los riesgos asociados con la nueva tecnología. Los profesionales médicos deben promover y mantener la seguridad de los empleados a través de una cuidadosa formación e información sobre gestión de riesgos. Se han identificado aplicaciones tecnológicas con impactos positivos potenciales en SHO (por ejemplo, ambiente de trabajo más seguro, trabajadores más saludables y mitigación de riesgos laborales), así como efectos negativos sobre el SHO (aunque hay evidencia de aumento del estrés, fatiga, enfermedades, problemas musculoesqueléticos y riesgos psicosociales) [9]. El estudio también mostró posibles brechas y oportunidades para futuras investigaciones. Estos resultados pueden ayudar a los gerentes a planificar y diseñar lugares de trabajo para la integración de la tecnología.

Para cumplir con estos requisitos, los operadores deberán tener a mano los conocimientos y las habilidades adecuados para poder recibir datos de retroalimentación y tomar decisiones complejas que garanticen que sean lo más eficientes posible. Obviamente, es importante mantener y mejorar la Seguridad y Salud en el Trabajo - OS&H [10]. Para realizar una mejora, se deberá realizar análisis específicos de cada tipo de trabajo a realizar, así como de sus aplicaciones tecnológicas en escenarios de producción industrial. La OS&H también es fundamental en el lugar de trabajo cambiante, por lo que es importante buscar siempre cómo garantizar y mantener un entorno seguro para su personal. Las tecnologías de asistencia inteligente son cada vez más frecuentes y se ha consolidado como una herramienta útil en la lucha contra el COVID-19. Teniendo en cuenta cómo la IA y los robots automáticos pueden ser las tecnologías más importantes de la industria 4.0. Las nuevas tecnologías de la industria pueden adicionalmente a ayudar a los gobiernos a identificar, rastrear, monitorear y tratar a los pacientes y aumentar la resiliencia en la sociedad y los entornos laborales durante la pandemia de COVID-19 y fuera de ella [11].

Hay nuevos riesgos que surgen del trabajo colaborativo con robots. Estos incluyen factores de riesgo psicosociales, éticos y cibernéticos, además, los beneficios y riesgos que implica trabajar con robots colaborativos, según el tamaño de la empresa y la industria, deben evaluarse antes de tomar una decisión. Se recomienda centrarse más en la participación del operador y específicamente en todo el proceso de evaluación y mitigación de riesgos, en colaboraciones humano-robot [12]. Posteriormente el desafío será cuán receptivo puede ser la legislación a los cambios en los riesgos causados por tecnologías en rápida evolución y encargarse de traducirlos en herramientas prácticas para empresas e ingenieros de diseño. Otro aspecto desafiante será la medición de riesgos nuevos, emergentes y, a veces, menos avanzados. La colaboración humano-robot es una de las tecnologías centrales de la Industria 4.0 y cambiará la industria manufacturera durante la próxima década. Los robots colaborativos son un nuevo tipo de tecnologías industriales que lo ayudan en los sistemas de producción ciber físicos. Combinan las fortalezas de los humanos con otras funciones para facilitar las cosas. La salud y la seguridad en el trabajo son cruciales para la implementación de robots colaborativos [13]. Para garantizar la seguridad y la ergonomía de los robots colaborativos en el lugar de trabajo, es necesario evaluar lo que es posible actualmente. También es muy importante investigar campos emergentes que aún no forman parte del "estado del arte".

#### *A.Principales aspectos que preocupan en la Industria 4.0 en torno a la Salud y Seguridad Ocupacional*

En la figura 2, se han agrupado los principales nuevos riesgos que se han considerado como nuevos según algunas las referencias empleadas en este artículo. Las nuevas situaciones de riesgo se han agrupado en tres aspectos principales: riesgos de tipo Físico, Psicosociales y Psicológicos [14]. Los riesgos Físicos se incorporan dentro de las preocupaciones de las nuevas industrias 4.0 al implementar a robots que interactúan con humanos. Los riesgos que se avizoran como más representativos respecto de los riesgos físicos son el contacto mecánico don la estructura mecánica del robot, la combustión espontánea o incendio que un

sistema mecatrónico con funcionamiento de sustancias podría generar, el contacto con circuitos eléctricos o cargas estáticas acumuladas, la interacción con sustancias químicas tanto volátiles como líquidas del robot, la exposición a radiaciones producidas del efecto electromagnético, exposición a ruidos muy frecuentes y nuevos provocados por los robots, imposición a un nuevo ritmo de acorde a las exigencias del robot en operación, el sedentarismo provocado por una menor exigencia requerida para el humano, y las exigencias visuales de las interfaces [15]. En cuanto a los riesgos psicosociales, se han identificado algunos aspectos como: el stress debido a interacción con robots a mas de la carga acelerada de trabajo y la reacción sicológica de compartir la jornada laboral con un robot. No se ha generado investigaciones en torno a este aspecto, sin embargo, es comprensible que este aspecto empieza en la actualidad a tornarse una necesidad para resolver problemas futuros. Los riesgos sicológicos han adoptado ciertas terminologías como la Tecnoadicción, Tecnofatiga y Tecnoansiedad, las cuales se producen como efecto de la interacción con sistemas robóticos, interfaces y sistemas electromecánicos con los que deberá interactuar.

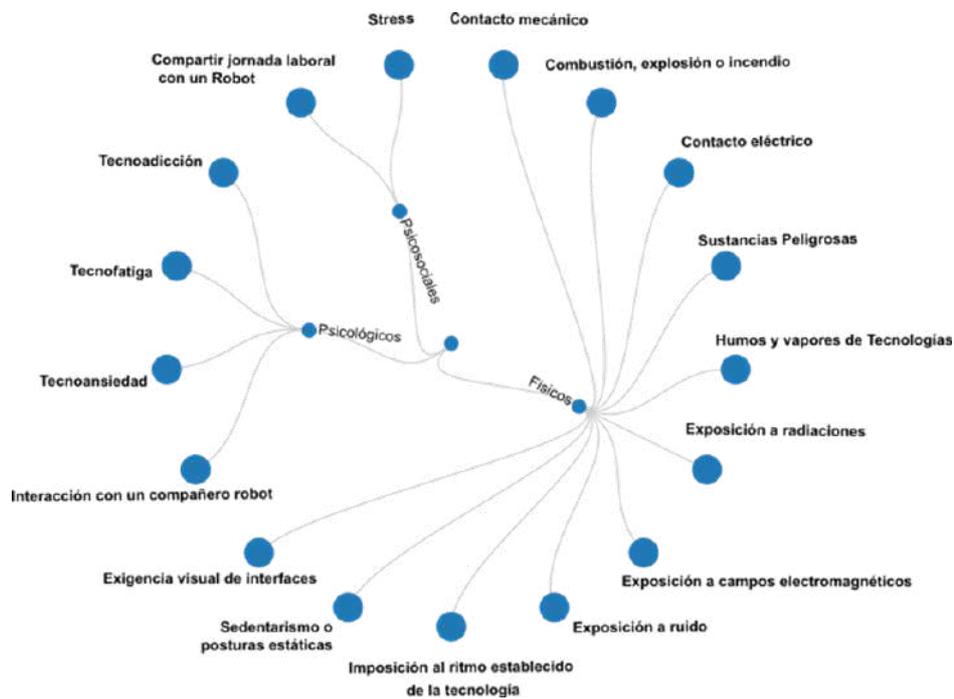


Fig 2. Principales riesgos potenciales de la interacción humano-robot en la industria 4.0

La tecnoadicción en el ámbito laboral, se impondrá en los futuros trabajadores debido a que las empresas aun en la actualidad han implementado (debido al COVID-19) nuevas alternativas que reducen la movilidad que han evitado perdidas de esos negocios y los han mantenido en el tiempo con ayuda de la tecnología, uso de redes sociales y permitiendo en ocasiones el teletrabajo. Con el tiempo la mayoría de los procesos deberán controlarse, monitorizarse y analizarse con ayuda de dispositivos que permiten obtener resultados menos afectados por errores humanos. La adicción al uso de la tecnología será un inconveniente ya que se mitiga la necesidad de resolver los problemas usando el raciocinio, esto degrada de cierta manera la actividad cerebral del trabajador, quien creará una mayor dependencia de la tecnología si esto no es controlado desde el ámbito psicológico [10].

La tecnofatiga laboral se ha identificado como sensaciones de cansancio físico y agotamiento mental debido al uso prolongado de las Tecnologías de comunicación TIC's. Como consecuencia el trabajador pierde la concentración trayendo consigo ciertos riesgos en sus actuaciones. La tecnofatiga puede afectar a cualquier persona que haga un uso inadecuado de la tecnología, pero afecta principalmente a aquellos que necesitan utilizar dispositivos tecnológicos para realizar su trabajo.

Luego a los estudiantes que realizan trabajos virtuales, como deberes y tareas escolares. Esto también es aplicable a los adolescentes que atraviesan una etapa de ampliación de las relaciones sociales con las personas que conocen en las redes sociales [15]. La tecnoansiedad es la causante de el "tecnoestrés" término que indica un tipo de estrés causado por las nuevas tecnologías en el trabajo. El efecto negativo que conlleva se debe a la introducción y uso de las tecnologías de la información y la comunicación. Las consecuencias de esta afectación conducen a situaciones como: Posturas inadecuadas, falta de concentración, atención y trastornos de sueño [4].

### III. METODOLOGÍA

La búsqueda de la información para esta revisión se realizó en los repositorios de SCOPUS, Web fo Science y ScienceDirect. En esta búsqueda se emplearon los términos "Health Safety Impact Indutry 4.0", la información fue buscada considerando los títulos de lo cual se encontraron un total de 118 documento y luego del proceso de depuración de los documentos se redujo este grupo a 15 artículos de los cuales se ha obtenido la información de referencia. En la figura 3 se observa una descripción del flujo de trabajo de la revisión sistemática basada en los criterios de PRISMA, se ha seleccionado la información de acuerdo con tu título, abstract y texto completo.

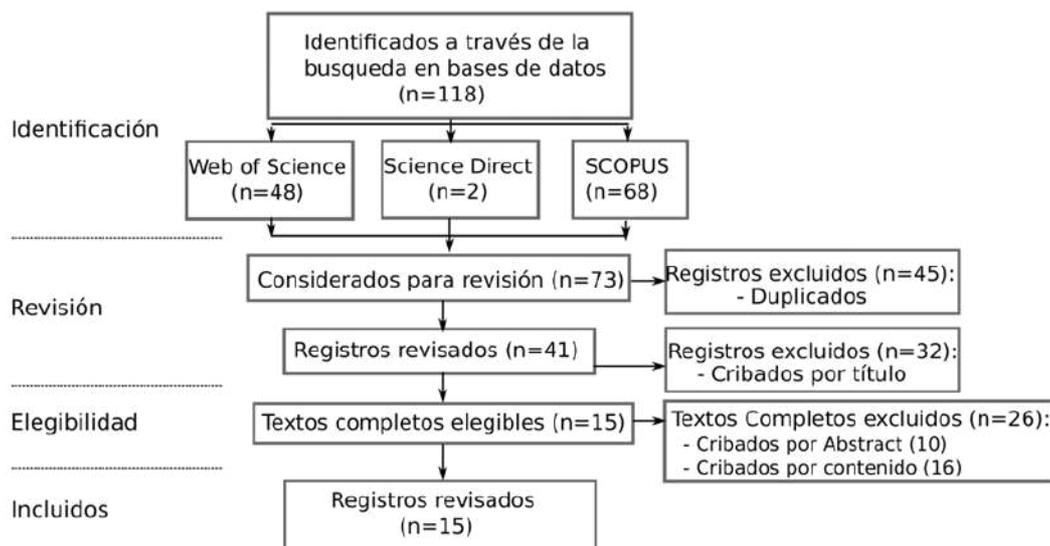


Fig 3. Revisión Sistemática realizada (Método PRISMA)

### IV. RESULTADOS

Se han hallado nuevos puntos de vista sobre aspectos relacionados principalmente con la interacción el robot y el humano, los estudios revisados, acuerdan que existen riesgos mecánicos, eléctricos y de exposición a factores de carácter electromagnético y sustancias tóxicas.

Términos nuevos como Tecnoansiedad, Tecnofatiga y Tecnoadicción, son nuevos en el ámbito laboral que se acerca junto con la imposición de la Industria 4.0. Sin embargo, y según la figura 2, son mas numerosos los tipos de riesgos físicos debido a la interacción humano-robot.

Con respecto a la parte sicosocial, se ha considerado riesgos derivados de la comunicación y flujo de tareas en conjunción con el robot. Dado que no existe posibilidad de negociación con un sistema robótico, el humano deberá adaptar sus horarios, actividades y tiempos a los requerimientos de sus colegas robóticos considerando el ámbito y exigencia física y dejando de lado en este estudio los posibles desacuerdos que se puedan ocasionar.

## CONCLUSIONES

La industria 4.0 obligará a una estructuración y replanteo de las normativas de seguridad y salud ocupacional, mismas que habrán de contemplar los aspectos descritos en la figura 2 y que se han planteado como primer paso en este ascenso a una industrialización mas inteligente y menos dependiente del raciocinio humano.

El impacto de la industria 4.0 incluye también la reestructuración de las tareas y la exigencia de mayor preparación de los trabajadores en el uso de las tecnologías, lo cual impulsa a su mejor formación profesional a la vez que desplaza sus exigencias físicas incorporando otros tipos de riesgos físicos en especial y los cuales deberán resolverse por los organismos de control regionales.

Existen casos en los que los riesgos psicológicos han incorporado un estrés debido a laborar en entornos continuamente observados lo cual genera un malestar debido a que el individuo siente que no se respeta su privacidad y de cierto modo se tiene incertidumbre sobre el cómo se utilizarán esa información por el personal de la empresa.

## REFERENCIAS

- [1] A. Badri, B. Boudreau-Trudel, y A. S. Souissi, «Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?», *Safety Science*, vol. 109, pp. 403-411, nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>.
- [2] R. Zorzenon, F. L. Lizarelli, y D. B. A. de A. Moura, «What is the potential impact of industry 4.0 on health and safety at work?», *Safety Science*, vol. 153, p. 105802, sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105802>.
- [3] J. Smallwood y C. Allen, «Practitioners' perceptions of the potential impact of Industry 4.0 on construction health and safety», *JEDT*, abr. 2022, doi: 10.1108/JEDT-11-2021-0635.
- [4] F. Sherratt, R. Dowsett, y S. Sherratt, «Construction 4.0 and its potential impact on people working in the construction industry», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, vol. 173, n.o 4, pp. 145-152, nov. 2020, doi: 10.1680/jmapl.19.00053.
- [5] S. Balasubramanian, V. Shukla, N. Islam, y S. Manghat, «Construction Industry 4.0 and Sustainability: An Enabling Framework», *IEEE Trans. Eng. Manage.*, pp. 1-19, 2022, doi: 10.1109/TEM.2021.3110427.
- [6] N. Berx, W. Decré, I. Morag, P. Chemweno, y L. Pintelon, «Identification and classification of risk factors for human-robot collaboration from a system-wide perspective», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 163, p. 107827, ene. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2021.107827.
- [7] N. Leesakul, A.-M. Oostveen, I. Eimontaite, M. L. Wilson, y R. Hyde, «Workplace 4.0: Exploring the Implications of Technology Adoption in Digital Manufacturing on a Sustainable Workforce», *Sustainability*, vol. 14, n.o 6, p. 3311, mar. 2022, doi: 10.3390/su14063311.
- [8] R. Bavaresco, H. Arruda, E. Rocha, J. Barbosa, y G.-P. Li, «Internet of Things and occupational well-being in industry 4.0: A systematic mapping study and taxonomy», *Computers & Industrial Engineering*, vol. 161, p. 107670, nov. 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107670.
- [9] S. Robla-Gomez, V. M. Becerra, J. R. Llata, E. Gonzalez-Sarabia, C. Torre-Ferrero, y J. Perez-Oria, «Working Together: A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26754-26773, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773127.
- [10] K. Jilcha y D. Kitaw, «Industrial occupational safety and health innovation for sustainable development», *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, n.o 1, pp. 372-380, feb. 2017, doi: 10.1016/j.jestch.2016.10.011.

- [11] V. Zaroushani y F. Khajehnasiri, «Application of Intelligent Technologies on Response to Covid-19 and Occupational Safety in Healthcare Workers», *Health Scope*, vol. 9, n.o 4, dic. 2020, doi: 10.5812/jhealthscope.109604.
- [12] C. Chute y T. French, «Introducing Care 4.0: An Integrated Care Paradigm Built on Industry 4.0 Capabilities», *IJERPH*, vol. 16, n.o 12, p. 2247, jun. 2019, doi: 10.3390/ijerph16122247.
- [13] J. Lee, I. Cameron, y M. Hassall, «Improving process safety: What roles for Digitalization and Industry 4.0?», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 132, pp. 325-339, dic. 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.10.021.
- [14] A. Adem, E. Çakit, y M. Dağdeviren, «Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0», *SN Appl. Sci.*, vol. 2, n.o 5, p. 977, may 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2817-x.
- [15] J. Lemos, P. D. Gaspar, y T. M. Lima, «Environmental Risk Assessment and Management in Industry 4.0: A Review of Technologies and Trends», *Machines*, vol. 10, n.o 8, p. 702, ago. 2022, doi: 10.3390/machines10080702.

## LOS AUTORES



**Juan Lopez**, Master en salud y seguridad ocupacional con mención en prevención en Riesgos laborales por la Universidad Internacional SEK, Especialista en toxicología laboral por la Universidad Internacional Sek docente titular en la cátedra de toxicología farmacología y primeros auxilios en la Universidad Católica de Cuenca de Ecuador



**Maiwa Chela**, Magister en Salud y Seguridad Ocupacional con mención en Prevención de riesgos laborales título obtenido en la Escuela Politecnica del Chimborazo en Riobamba -Ecuador.



**Victor Perez**, Médico General, con Maestría en Salud y Seguridad Ocupacional y Prevención de riesgos, Master en Prevencion, Seguridad y Salud en el Trabajo, Master Profesional en Prevencion de Riesgos laborales.



**Franco Vallejo**, Estudiante de Doctorado en ciencias médicas de la Universidad de Zulia - Venezuela. Doctor en Medicina y Cirugía, Especialista en G. Salud Ocupacional, Máster en Prevención de riesgos laborales, Máster en Sistemas integrados de gestión

<https://doi.org/10.47460/athenea.v3i10.47>

# Impactos tecnológicos en el aprovechamiento y uso de la Energía Solar

Balladares Paul  
<https://orcid.org/0000-0003-0855-270X>  
ppaulball@gmail.com  
Ejercito Ecuatoriano  
Primera División de Ejercito SHYRIS.  
Quito-Ecuador

Torres Leslie  
<https://orcid.org/0000-0002-5093-9521>  
leslie.torres.zarria@udla.edu.ec  
Universidad de las Américas  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
Ingeniería Industrial  
Quito-Ecuador

Castro Vanessa  
<http://orcid.org/0000-0001-8571-6726>  
vmcastrog@uce.edu.ec  
Universidad Central del Ecuador  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
Ingeniería en Diseño Industrial  
Quito-Ecuador

Recibido (27/08/2022), Aceptado (05/09/2022)

## Resumen:

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica de factores y aspectos que afectan al ambiente, sus recursos y biodiversidad debido a la presencia, cercanía, y operación de estaciones o plantas generadoras de energías renovables y/o limpias. Estos tipos de fuentes de energía, si bien contribuyen a reducir el impacto ambiental, para su implantación y funcionamiento requieren de espacio físico, uso de sustancias químicas, liberación de gases de varios procesos generando impactos en la fauna, flora a más de generar residuos contaminantes si los procesos no son completamente controlados. Se realizó una revisión sistemática considerando bases de artículos científicos de revistas relacionadas con estudios ambientales y con una búsqueda e identificación de los impactos negativos en la producción de energías renovables y limpias. El impacto negativo que genera la producción de energías y no convencionales comprende un número considerable de factores negativos cuyos efectos se incrementan de manera proporcional con la demanda energética creciente y proporcionando afectaciones no muy estudiadas con respecto a la contaminación de la naturaleza, alteraciones en la biodiversidad y la huella ambiental.

**Palabras clave:** impacto negativo, energías limpias, generación de energía, energías renovables.

## Technological impacts on the exploitation and use of Solar Energy

### Abstract:

This document provides a bibliographic review of factors and aspects affecting the environment, its resources and biodiversity through the presence, proximity and operation of power plants or renewable and/or clean energy facilities. Although these types of energy sources contribute to a reduction in environmental impact, their implementation and operation require physical land, use chemical substances, release gases from various processes that impact fauna and flora, and generate environmentally harmful waste if the processes are not fully controlled. A systematic study was carried out, taking into account the basics of scientific articles from journals related to environmental studies, looking for and identifying the negative impacts of renewable and clean energy production. The negative impacts caused by the production of energy and non-conventional energy include a considerable number of negative factors, whose effects increase proportionally.

**keywords:** negative impact, clean energy, power generation, renewable energies

## I. INTRODUCCIÓN.

El incremento de la densidad poblacional ha promovido la necesidad del incremento en la capacidad de producción de energía eléctrica para satisfacer las demandas energéticas. En la actualidad la generación de energía se ha robustecido en los sistemas energéticos de países y ciudades, con el aumento en la implementación de estaciones generadoras de energías no renovables y limpias, se avizora un futuro en el que estas nuevas alternativas se utilizarán en sistemas inteligentes promoviendo inclusive una economía en la que el usuario final podrá vender la energía que no consuma [1] pudiendo negociar con ella. Las fuentes de energía no renovables se caracterizan por ser fuentes finitas o agotables en función del tiempo y la demanda, lo que supone y justifica el esfuerzo de las naciones para el desarrollo tecnológico en la producción y aprovechamiento de nuevas posibilidades que consideren su uso y que permitan satisfacer las demandas de los habitantes sin afectar al medioambiente [2] (Fig.1).

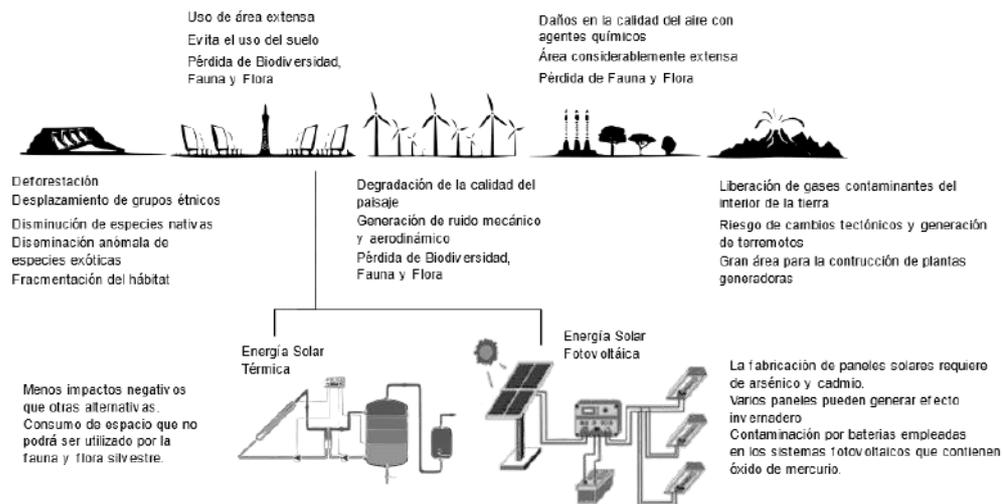


Fig. 1. Impactos negativos de la energía solar y otras de las energías renovables de mayor uso.

Las diferentes fuentes de energía renovables o alternativas permiten generar electricidad sin tener que depender de combustibles fósiles, carbón, gas natural o energía nuclear. La electricidad se genera utilizando fuentes de energía renovables y limpias como la geotérmica, solar, hidráulica, eólica y de biomasa. Se sabe que este tipo de energías dañan el medio ambiente, así como la salud de la fauna y habitantes. Estos daños pueden ocurrir tanto a corto como a largo plazo, primero afectando negativamente los ciclos de vida, solo para volverse más dañinos con el tiempo [3]. Las fuentes renovables pueden afectar a la biodiversidad y el ecosistema circundante. Esto se debe a que pueden disminuir las áreas naturales disponibles, lo que a su vez resultará en un cambio de condiciones afectando la biodiversidad, producción de gases, efecto invernadero. Se considera nocivo el uso de productos químicos que son tóxicos y son usados en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos.

El desarrollo económico y las actividades diarias de la población dependen del uso de la energía. La energía es necesaria para el desarrollo de las actividades domésticas y productivas diarias [4].

El uso de la energía renovable ha aumentado en los últimos años debido a los altos precios de la energía, la preocupación por el medio ambiente y la disponibilidad de tecnologías más avanzadas. Se espera que el uso de la energía renovable continúe aumentando en el futuro.

Este documento describe las posibles influencias negativas y efectos secundarios que las fuentes de energía limpias y renovables pueden tener en el medio ambiente. En la sección Desarrollo se abordan los efectos adversos e impactos negativos que están relacionados con estas nuevas tecnologías de generación de energía. En la metodología se describe como se obtuvo y analizó la información, posterior a ello la discusión y finalmente las conclusiones.

## II. DESARROLLO

El sol es el recurso natural más importante para nuestro planeta debido a energía abundante que provee a diario. La energía solar se puede utilizar, entre otras cosas, para proporcionar soluciones térmicas como cocinar, calentar agua y cultivos [5]. hasta aplicaciones de generación de energía eléctrica mediante el uso de plantas solares térmicas o que aprovechan el efecto fotovoltaico. Una parte de la energía solar también se aprovecha en el ámbito agropecuario para llevar a cabo la producción primaria. El sol emite energía a razón de  $3,86 \times 10^{26}$  Watts de los cuales aproximadamente  $1,74 \times 10^{17}$  Watts son interceptados por la Tierra.

La energía solar proporciona importantes ventajas ambientales en comparación con las fuentes de energía convencionales como los combustibles fósiles que aumentan directamente la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, contribuyendo así al desarrollo sostenible de las actividades humanas . El Sol regula las condiciones climáticas del mundo y muchos otros procesos físicos en la Tierra (ya sea directa o indirectamente). Los estudios han demostrado que la generación de electricidad a partir de la luz solar directamente a través de fotovoltaica e indirectamente a través de la concentración de energía solar mediante procesos solares térmicos, durante la última década ha ido creciendo exponencialmente a nivel mundial. La energía del Sol se considera limpia e inagotable ya que es relativamente infinita [6]. Las tecnologías de energía solar reducen la emisión de gases de efecto invernadero, prevención de la emisión de gases tóxicos, reducción de la línea de transmisión requerida de las redes eléctricas.

La mayor generación de energía solar se puede explotar de muchas maneras, las más comunes son:

1. Centrales Solares Térmicas (Para electricidad y calor)
2. Sistemas solares térmicos (Para energía térmica)
3. Sistemas fotovoltaicos (Para la generación de electricidad)

La energía solar se define ampliamente en dos categorías, células fotovoltaicas (PV) y energía solar concentrada (CSP) . Las células fotovoltaicas funcionan convirtiendo la radiación solar en corriente eléctrica, mientras que la tecnología CSP emplea propiedades reflectantes para concentrar la luz solar en un haz que se redirigiría para calentar un fluido (por ejemplo, aceite o agua) en un receptor [7]. La energía solar, como todos los demás procesos, tiene una serie de efectos negativos y dañinos para el medio ambiente. Pueden tener un efecto adverso sobre las personas en el área y otros organismos vivos en el medio ambiente. Una de las muchas desventajas es que requieren una energía significativa para producir y pueden ocupar espacio que podría ser necesario para otros fines y se ocupa para el montaje de paneles solares. La figura 2, presenta esquemas de las categorías de captadores de energía solar CSP y PV. En todos los casos su implementación requiere de áreas considerables de acuerdo con la demanda a satisfacer, capacidad generada y velocidad de consumo de los usuarios [5].

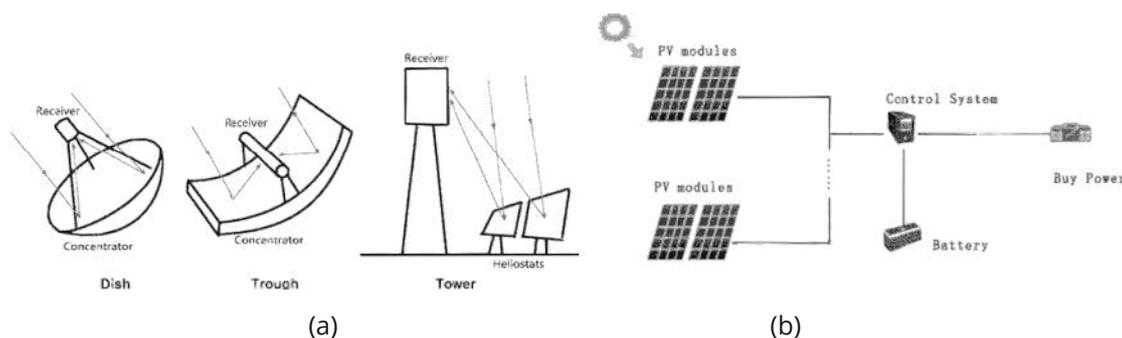


Fig. 2. Sistema de aprovechamiento de energía solar térmica (a) y fotovoltaica (b)

El sistema de energía solar térmica es un dispositivo que utiliza la radiación proveniente del sol para la generación de electricidad a través de la conversión solar térmica. La radiación solar recolectada se convierte en electricidad mediante el uso de un equipo (es decir, un generador termoeléctrico-TEG, también llamado generador Seebeck, que es un dispositivo en forma sólida que cambia la temperatura diferencial en electricidad a través de un efecto termoeléctrico. Históricamente, existen varios tipos de colectores Seebeck, incluidos los colectores parabólicos compuestos, de tubo de vacío, de placa plana, de disco parabólico, cilindro parabólico y de campo de heliostatos [8]. Se requieren muchos equipos e instalaciones para este proceso. Además, las centrales termo solares utilizan agua, que cuando se calienta produce vapor que hace girar una turbina para producir electricidad. Hay numerosas formas de hacerlo. Algunos utilizan espejos curvos que siguen el movimiento del Sol y concentran la radiación solar hacia tuberías que están llenas de agua u otras formas de líquidos. Otros diseños utilizan espejos giratorios planos que son largos por naturaleza. Estos espejos giratorios son menos costosos.

La capacidad de la generación de energía solar térmica para absorber todas las longitudes de onda en el espectro electromagnético es uno de los principales significados. Esto da como resultado una eficiencia superior al 90% en la reflexión de la energía solar. Sin embargo, la eficiencia de dicha generación con respecto a la producción de electricidad está entre el 30-40%. Algunos utilizan espejos curvos que siguen el movimiento del Sol y concentran la radiación solar hacia tuberías que están llenas de agua u otras formas de líquidos [9]. En los sistemas solares térmicos, se aprovecha la radiación solar, la radiación se utiliza directamente para calentar (cocinar) o para preparar agua caliente. El proceso es respetuoso con el medio ambiente, ya que la energía del sol se puede utilizar directamente para cocinar y secar los cultivos, lo que resultó ser eficaz. El proceso requiere menos instalaciones y puede ser una opción prometedora capaz de ser una de las energías líderes para cocinar.

#### A. Efectos adversos de la energía solar

La energía solar se considera la forma más segura de energía renovable y la mejor energía para el futuro. La fuente de energía solar es el sol, que es la principal fuente de energía del universo. Existen múltiples problemas con la producción y el uso de la energía solar. Estos efectos pueden ocurrir a lo largo de la vida útil de las plantas de energía solar en magnitudes variables. Los impactos pueden ser directos, indirectos o relacionados con la eficiencia presupuestaria y energética, el impacto en la pérdida de biodiversidad, el uso y consumo del agua, polvos y suelos, la calidad del aire y la salud humana, los canales de transporte, el uso y cambios de la tierra [10]. La figura 3 presenta una descripción de los Impactos negativos, ventajas y desventajas que se ha considerado en múltiples fuentes empleadas en este documento.

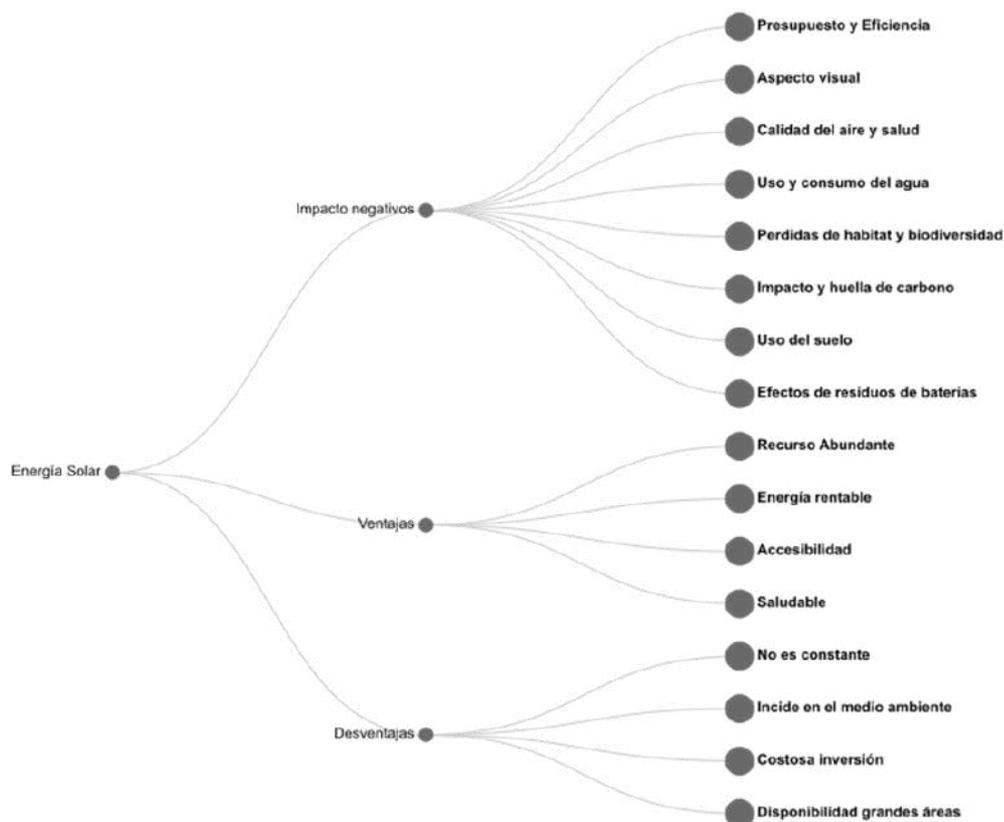


Fig. 3. Impactos negativos, ventajas y desventajas en el uso de la energía Solar

La fabricación de módulos fotovoltaicos requiere de una gran cantidad de energía. Los estudios muestran que las plantas de energía que fabrican módulos fotovoltaicos usan grandes cantidades de energía y requieren grandes cantidades de energía para instalarse. Este es uno de los efectos negativos de los sistemas solares. Las celdas de silicio cristalino (Si), están formadas por una pieza finamente laminada (wafer), un cristal de silicio (monocristalino) o un bloque entero de cristales de silicio (multicristalino), su eficiencia oscila entre el 12% y el 19% y una alta cantidad de energía se requiere para construir las células fotovoltaicas. Este material es abundante en el medio ambiente [11]. Según los informes, la vida útil esperada de las células solares es de 15 a 30 años, y la eficiencia disminuye año tras año. En promedio, la cantidad de luz solar, incluida la energía solar o el espectro electromagnético total, alcanza un máximo de alrededor de 1 KW/m<sup>2</sup>, tanto temprano en la mañana como tarde en la noche (en la mayoría de los casos, el sol está en su punto máximo). Tras un examen cuidadoso, aproximadamente el 90 % de la energía solar se encuentra en el pico del sol, con un promedio entre las 8 am y las 4 p. m, variando según la localidad, la distancia desde el ecuador y los horarios estacionales. La cantidad de energía producida por una celda solar de 1m<sup>2</sup> está entre 140-170W pico.

El período de depreciación fotovoltaica es la cantidad de tiempo que tarda el sistema fotovoltaico en devolver la energía invertida en la construcción de todos los componentes del sistema, así como la energía necesaria para el daño después de que se haya utilizado. sistema óptico. Por supuesto, el tiempo de consumo de energía varía con los diferentes sitios del sistema, por lo que, en sitios con una gran cantidad de energía solar radiante, la vida útil será mucho más y más corta, es decir, 10 veces o más. En comparación con las fuentes de energía convencionales, la eficiencia de la energía solar es muy baja. Con respecto al aspecto visual, la penetración óptica depende en gran medida del tipo de esquema y del entorno del sistema fotovoltaico. Está claro que, si aplicamos un sistema óptico cerca de una zona de belleza natural, el efecto óptico será muy alto [11].

Si bien la energía solar en la fase de operación no emite sustancias nocivas al medio ambiente, durante las fases de construcción, transporte, mantenimiento y desmantelamiento se liberan sustancias tóxicas al medio ambiente. Estas emisiones y descargas representan un riesgo significativo para la salud de las personas en toda la región. Las partículas de sílice pueden liberarse durante la extracción y purificación de las materias primas; si son lo suficientemente pequeñas, pueden inhalarse y causar silicosis. La producción de paneles de silicio puede incluir; F, Cl, NO<sub>3</sub>, isopropanol, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, partículas de sílice, ácidos y disolventes que se considera que presentan riesgos agudos o crónicos para la salud. La construcción de energía solar a gran escala, como cualquier otra gran industria, puede afectar la calidad del aire, pudiendo ser además, perjudicial para la salud de los empleados y del público en general. Dichos peligros incluyen la liberación de patógenos del suelo en los procesos de limpieza, aumentos de partículas en el aire como polvo, disminución de la visibilidad para los conductores en las carreteras cercanas y la contaminación de los depósitos de agua. Un ejemplo de lo antes comentado es la degradación del suelo en áreas áridas de América del Norte y del Sur, que son lugares objetivo para las plantas solares [12].

El aumento del transporte de los componentes para implementar una planta de generación solar, imponen perturbaciones del suelo induciendo posteriormente concentraciones de contaminantes en el polvo transportado por el aire dentro de lugares que tienen suelos superficiales con trazas de contaminantes radiactivos como radio nucleótidos y productos químicos nocivos como residuos agroquímicos. En la mayoría de los casos, las células fotovoltaicas no se reciclan durante las fases de desmantelamiento dando como resultado contaminaciones por corrosión de elementos tóxicos como cadmio, polvo de sílice y arsénico de las celdas, que pueden ser perjudiciales para la salud humana. La exposición prolongada al polvo de sílice puede provocar silicosis, una enfermedad de los pulmones, que puede ser fatal en casos graves [13]. Cuando se produce un derrame de productos químicos como refrigerantes o fluidos de transferencia de calor o supresores de polvo, puede provocar la contaminación de las aguas superficiales, subterráneas y profundas. El agua es uno de los principales bloques de construcción de las células de silicio. La producción de células solares de silicio requiere grandes cantidades de agua pura para limpiar las obleas de silicio. La energía solar fotovoltaica (PV) requiere agua para limpiar los paneles y generar calor. Su tasa de consumo es de 0 a 33 galones/MWh con un valor medio de 26 galones/MWh. Los sistemas de concentración de energía solar (CSP) también requieren agua para las torres de enfriamiento que oscilan entre 600 y 650 galones de agua por MWh.

Un análisis reciente en instalaciones fotovoltaicas y de CSP con refrigeración seca muestra que el control del polvo para la energía solar a gran escala es el factor dominante (60-99 %) del consumo total de agua en el suroeste de EE. UU. La energía solar consume una gran cantidad de agua como resultado de la refrigeración húmeda, unos 3,07 m<sup>3</sup>/MWh. Esto es mucho más que el consumo total de gas natural y carbón [14]. Muchos hábitats biológicos son destruidos a través de la minería y extracción de Recursos Naturales tales como Cuarzo, Carburo de Silicio, Vidrio y Aluminio. La instalación de paneles solares a gran escala que tienen un impacto devastador en la biodiversidad de ese entorno en particular requiere una gran área del entorno natural. En algunos casos, la gran infraestructura solar puede fragmentar los hábitats y actuar como barreras lineales para los patrones de migración de ciertas especies de vida silvestre. Aunque algunos animales de gran movilidad o de amplio alcance pueden ser capaces de eludir esta infraestructura, otros son en su mayoría superables para aumentar el riesgo de interrupción del flujo de genes entre las poblaciones a ambos lados de las infraestructuras.

Las celdas solares, como muchos otros sistemas, tienen un impacto negativo en el medio ambiente durante el proceso de fabricación. La energía necesaria para producir los sistemas de energía solar actuales todavía se produce de forma tradicional. Algunas de las sustancias químicas tóxicas utilizadas en el proceso de fabricación se producen como subproductos. En particular, las celdas solares tienen una vida corta y contienen metales pesados como el cadmio, que representa una amenaza para los recursos naturales. Los combustibles fósiles se utilizan para extraer materias primas y transportar estos materiales a las plantas de fabricación. La energía de la red también se utiliza en el procesamiento y producción de materiales y también puede generar emisiones de dióxido de carbono [15].

Se despeja una gran área para instalar paneles solares. Las celdas solares (fotovoltaicas) tienen muchos impactos en el ecosistema natural. Estos impactos están relacionados con varios factores específicos, como la cantidad de tierra y terreno que puede cubrir ecosistemas sensibles y el impacto potencial de instalar paneles solares en la biodiversidad. La aplicación de células solares a la tierra cultivable puede dañar las áreas de producción de la tierra. El uso de la tierra a gran escala también afecta el equilibrio térmico de la región al absorber más energía de la Tierra de la que se refleja desde la superficie de la tierra hacia el espacio. Las aplicaciones serias de la energía solar tendrán que utilizar kilómetros cuadrados de áreas desérticas. El balance de calor de este espacio terrestre ciertamente puede verse afectado por tales aplicaciones [15].

Las células solares no emiten contaminantes durante su funcionamiento. Sin embargo, los módulos solares contienen ciertas sustancias peligrosas que pueden liberarse al medio ambiente en caso de incendio o desmontaje. Varios productos químicos tóxicos se utilizan en la construcción de paneles solares. Estas sustancias tóxicas pueden liberarse al medio ambiente como desechos. La mayoría de los productos utilizados no son biodegradables y suponen un riesgo importante para los organismos que viven en el medio ambiente. Otros efectos nocivos de la energía solar incluyen la erosión del suelo. Esto puede deberse a la deforestación o tala para dejar espacio a los paneles solares o para obtener materias primas para la producción de paneles. La mayoría de las instalaciones de infraestructura de USSE requieren cambios significativos en el paisaje. Tales modificaciones incluyen; remoción de vegetación, nivelación de la tierra, compactación del suelo, construcción de caminos de acceso y actividades que aumentan la pérdida de suelo por el viento y el agua.

### III. METODOLOGÍA

De la revisión realizada en la base de IEEE Xplore y Web of Sciences, bases de datos que abordan proyectos de ingeniería y desarrollos en temáticas de energías limpias y renovables, se obtuvieron un total de 251 documentos al realizar una búsqueda que contenía los términos: Impactos, Negativos, Producción, Energías Limpias, se ilustra en la figura 4 el procedimiento realizado en la revisión sistemática. Se identificaron 55 documentos duplicados de lo cual quedaron 196 trabajos para la etapa de revisión, de estos, se discriminaron a 196 debido a que en la revisión del título y abstract a pesar de la relación, no abordaban los aspectos negativos que impactaban al medio ambiente o biodiversidad. De los 87 trabajos restantes, se revisaron los desarrollos discriminando así a 62 trabajos que no identificaban de manera objetiva y con suficiente detalle, los factores o aspectos perjudiciales para el entorno. Finalmente, se consideraron 14 trabajos con información relevante para este desarrollo.

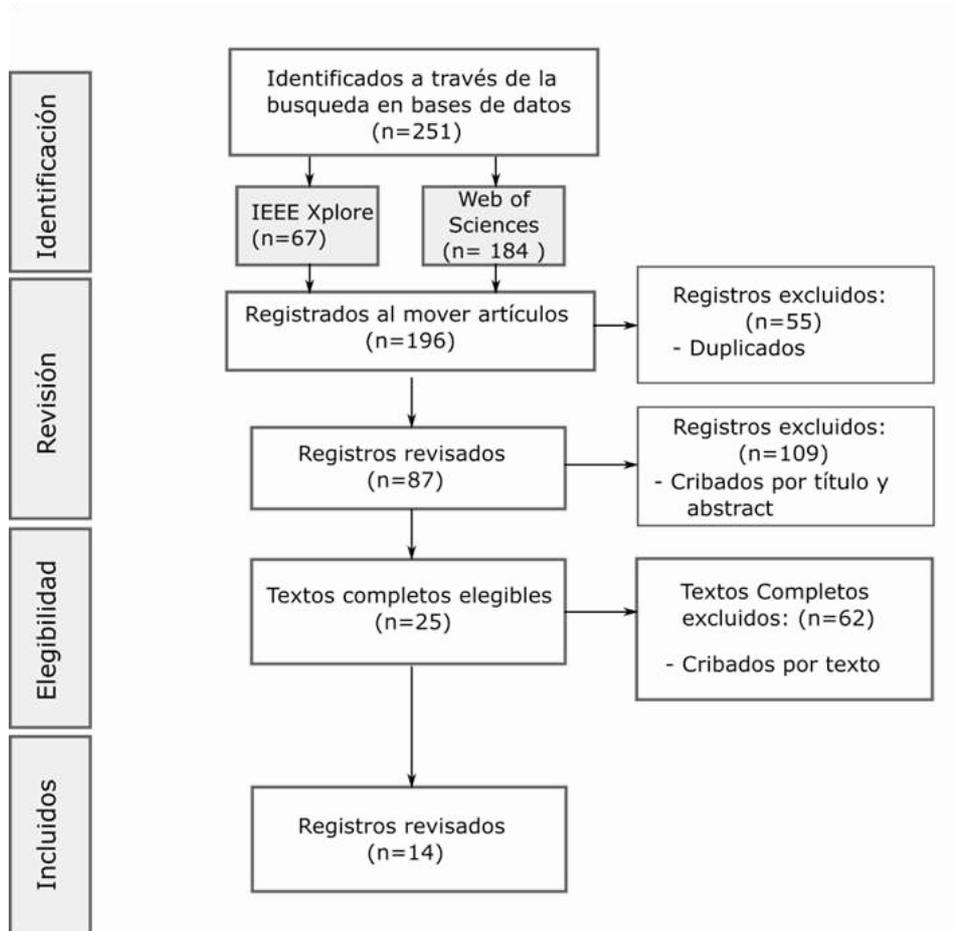


Fig. 4. Flujo de trabajo de la revisión realizada basada en la metodología PRISMA

#### IV. RESULTADOS

De la información abordada en este artículo de revisión sistemática, se han encontrado múltiples factores que afectan directamente a la fauna, flora, habitantes cercanos a las zonas e inclusive afectaciones en entornos más lejanos.

La generación y producción de energía solar desde la fabricación de las tecnologías incorpora aspectos de contaminación como los químicos descritos en secciones anteriores y que se utilizan para fabricar celdas solares y baterías que se requieren en este tipo de sistemas. EL uso de materiales como el mercurio y una mala administración de estos recursos y residuos puede ser motivo de contaminación del agua inclusive para el consumo humano, lo que incorpora una posibilidad de efecto negativo que debe ser cuidadosamente tratado.

El uso de silicio como material base para las celdas solares y componentes de los circuitos de control de los sistemas fotovoltaicos, generan una serie de partículas que puede afectar a los trabajadores que están en contacto y pueden respirarlas si no se usa la protección debida.

Se ha evidenciado en algunos trabajos, las afectaciones y desplazamiento de la fauna que ha dejado su hábitat debido a que las generadoras de energía han ubicado ahí sus plantas afectado además a la fauna regional y modificando la biodiversidad.

Se ha comentado además que el uso de estaciones generadoras de energía eléctrica a partir de energía solar impulsa el efecto invernadero y con ello dejando una huella de carbono que puede hacerse visible a mediano y largo plazo.

## CONCLUSIONES

Existe una diversidad de vacíos en el conocimiento referente a los impactos de la energía solar como método de generación de energía eléctrica. La documentación científica reconoce que existen aspectos relacionados con la fauna, flora y afectaciones de su hábitat, sin embargo, no se han realizado estudios lo suficientemente consistentes en torno a estos aspectos ni se han categorizado o sistematizado sus análisis de manera completa.

El aumento del uso de la energía solar como fuente primaria de energía, en la actualidad, se torna inminente, muchos países en sus planes para el futuro ya consideran este crecimiento el cual se ha tomado de referencia inclusive para la generación y proliferación de redes inteligentes de distribución de energía y su suministro en ciudades e industrias.

En vista de la casi constante y reducida eficiencia de los sistemas captadores de energía fotovoltaica y térmica, la tecnología de aprovechamiento de esta energía se verá obligada a emplear más área física lo cual evitará que esta sea aprovechada en actividades agropecuarias afectando regiones circundantes de manera notoria.

Según se evidencia, el empleo de energía térmica solar es una de las alternativas que menos generar afectaciones en el medio ambiente, por tanto optar por estas tecnologías puede reducir y mitigar el impacto negativo en el aprovechamiento de la energía fotovoltaica

## REFERENCIAS

- [1] A. Naidoo, «The socio-economic impacts of solar water heaters compared across two communities: A case study of Cato Manor», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109525, mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109525.
- [2] A. Azarpour, S. Suhaimi, G. Zahedi, y A. Bahadori, «A Review on the Drawbacks of Renewable Energy as a Promising Energy Source of the Future», *Arab J Sci Eng*, vol. 38, n.o 2, pp. 317-328, feb. 2013, doi: 10.1007/s13369-012-0436-6.
- [3] M. Z. A. Ab Kadir, Y. Rafeeu, y N. M. Adam, «Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n.o 9, pp. 3023-3031, dic. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.062.
- [4] J. W. Kimball, B. T. Kuhn, y R. S. Balog, «A System Design Approach for Unattended Solar Energy Harvesting Supply», *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, n.o 4, pp. 952-962, abr. 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2009056.
- [5] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, y K.-H. Kim, «Solar energy: Potential and future prospects», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 894-900, feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.094.
- [6] I. T. Michailidis, S. Baldi, M. F. Pichler, E. B. Kosmatopoulos, y J. R. Santiago, «Proactive control for solar energy exploitation: A german high-inertia building case study», *Applied Energy*, vol. 155, pp. 409-420, oct. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.06.033.
- [7] J. Pokorny et al., «Solar energy dissipation and temperature control by water and plants», *IJW*, vol. 5, n.o 4, p. 311, 2010, doi: 10.1504/IJW.2010.038726.
- [8] M. Zhang et al., «Efficient, low-cost solar thermoelectric cogenerators comprising evacuated tubular solar collectors and thermoelectric modules», *Applied Energy*, vol. 109, pp. 51-59, sep. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.03.008.

- [9] B. Akash, A. M. A. Abdo, O. Akash, y M. S. Mohsen, «Scopus-based Analysis of Peer-Reviewed Literature Related to Solar Energy in GCC Countries», *Procedia Computer Science*, vol. 83, pp. 750-757, 2016, doi: 10.1016/j.procs.2016.04.163.
- [10] D. R. Cameron, B. S. Cohen, y S. A. Morrison, «An Approach to Enhance the Conservation-Compatibility of Solar Energy Development», *PLoS ONE*, vol. 7, n.o 6, p. e38437, jun. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0038437.
- [11] M. K. H. Rabaia et al., «Environmental impacts of solar energy systems: A review», *Science of The Total Environment*, vol. 754, p. 141989, feb. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141989.
- [12] S. M. Ladjevardi, A. Asnaghi, P. S. Izadkhast, y A. H. Kashani, «Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption», *Solar Energy*, vol. 94, pp. 327-334, ago. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.05.012.
- [13] H.-Y. Wang et al., «Adverse Effects of Excess Residual PbI<sub>2</sub> on Photovoltaic Performance, Charge Separation, and Trap-State Properties in Mesoporous Structured Perovskite Solar Cells», *Chem. Eur. J.*, vol. 23, n.o 16, pp. 3986-3992, mar. 2017, doi: 10.1002/chem.201605668.
- [14] M. Chandrasekar, P. Gopal, C. Ramesh Kumar, y V. Edwin Geo, «Effect of solar photovoltaic and various photovoltaic air thermal systems on hydrogen generation by water electrolysis», *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n.o 5, pp. 3211-3223, ene. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.205.
- [15] T. D. J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, G. Castro-Badilla, y J. M. Obando-Ulloa, «Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética», *TM*, vol. 29, n.o 8, p. 46, dic. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i8.2984.

## LOS AUTORES



**Paul Balladares**, Mayor e Ingeniero Militar de la Brigada No. 17 "PASTAZA", Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Chimborazo, Licenciado en Ciencias Militares de la Universidad del Fuerzas Armadas ESPE, Magíster en Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional EPN, Diplomado en Modelación Hidráulica e Hidrológica por CIDHMA Capacitación (Perú).



**Leslie Torres**, Estudiante de la Carrera de Ingeniería Industrial en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de las Américas en Quito-Ecuador. Su ámbito de Investigación son las Energías no convencionales y la Industria 4.0



**Vannesa Castro**, Estudiante de la Carrera de Ingeniería en Diseño Industrial en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Central del Ecuador en la ciudad de Quito-Ecuador. Su ámbito de Investigación es el Diseño, y el impacto ambiental de las nuevas tecnologías de producción industrial.

<https://doi.org/10.47460/athenea.v3i10.48>

## Respuesta natural de los materiales y dispositivos termoeléctricos

Pirela Ronald  
<https://orcid.org/0000-0002-1411-6333>  
repirelalc@estudiante.unexpo.edu.ve  
IEEE Membership  
Alstom Ferroviaria, S.p.A.  
Savigliano-Italia

Velásquez Sergio  
<https://orcid.org/0000-0002-3516-4430>  
svelasquez@unexpo.edu.ve  
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz  
Estado Bolívar-Venezuela

Recibido (13/07/2022), Aceptado (09/10/2022)

### Resumen

La presente investigación tiene como objetivo introducir la teoría de la respuesta natural de los circuitos eléctricos al estudio de la termoelectricidad y la caracterización de dispositivos y materiales termoeléctricos. Se encontraron nuevas ecuaciones para calcular la resistencia térmica de los contactos  $R_{cold}$  y  $R_{hot}$ , la conductancia térmica  $K_0$  y la figura de mérito  $ZT$ . Además, permite determinar las constantes de tiempo características  $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_{th}$  y los tiempos de relajación; así como calcular las capacitancias termoeléctricas relacionadas con el dispositivo, el material y los contactos térmicos. También, se predicen las frecuencias angulares características  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  y  $\omega_{th}$ . La nueva teoría descrita satisface la ley de enfriamiento de Newton, la teoría de los coeficientes de transporte térmico de Luttinger y el comportamiento del circuito eléctrico de primer y segundo orden. Adicionalmente, pone a disposición la predicción de los coeficientes de transporte y la caracterización in situ. Al igual que el método de Harman, estos parámetros se pueden medir simultáneamente en la misma muestra.

**Palabras clave:** Figura de mérito, frecuencias angulares termoeléctricas, caracterización termoeléctrica, constantes de tiempo termoeléctricas.

## Natural response of thermoelectric materials and devices

### Abstract

The research aims to introduce the theory of the natural response of electrical circuits to the study of thermoelectricity and the characterization of thermoelectric devices and materials. New equations were found to calculate the thermal resistance of the contacts  $R_{cold}$  and  $R_{hot}$ , the thermal conductance  $K_0$ , and the figure of merit  $ZT$ . Furthermore, permits determine characteristic time constants  $\tau_0$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_{th}$  and relaxation times, as well as calculate the thermoelectric capacitances related to the device, material, and thermal contacts. Also, the characteristic angular frequencies are predicted  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  and  $\omega_{th}$ . The described theory satisfies the Newton's law of cooling, the Luttinger's thermal transport coefficients theory, and the first and second-order electric circuit's behavior. Additionally, it makes available the prediction of the transport coefficients and the characterization in situ. Like Harman' method, these parameters can be measured simultaneously on the same device or sample.

**Keywords:** figure of merit, thermoelectric angular frequencies, thermoelectric characterization, thermoelectric time constants.

## I. INTRODUCCIÓN

Los materiales y módulos termoeléctricos TEM, por sus siglas en inglés (Thermoelectric Modules and Thermoelectric Materials), son convertidores de energía de estado sólido que normalmente consisten en arreglos de material semiconductor de tipo (p y n), conectados térmicamente en paralelo y eléctricamente en serie. Los TEM se comercializan para aplicaciones en las áreas de refrigeración y calefacción; así como también, para la generación de energía eléctrica [1], [2], [3], [4]. El nuevo conocimiento de los fenómenos termoeléctricos y sus aplicaciones prácticas se extiende a una variedad de pequeñas publicaciones, principalmente artículos de revistas, presentaciones de conferencias y actas, pero también algunos capítulos de libros que pueden ser consultados en [4], [5]. Uno de los arduos trabajos que se deben realizar en el campo de la termoeléctrica es la caracterización de materiales y módulos termoeléctricos. Es fundamental obtener mediciones fiables de la eficiencia global para evaluar su interés tecnológico y económico [6]. El rendimiento termoeléctrico se reduce a la determinación de una sola cantidad llamada figura de mérito  $ZT$  y una forma de expresarla se presenta en (1), donde  $\bar{T}$  es la temperatura promedio de trabajo del sistema,  $R_m$  es la resistencia eléctrica del módulo,  $K_0$  es la conductancia térmica a la corriente eléctrica que se desvanece, y  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck global que caracteriza el acoplamiento termoeléctrico entre la corriente eléctrica y el flujo de calor a través de los terminales del TEM [7].

$$ZT = \frac{\alpha^2 \bar{T}}{R_m K_0} \quad (1)$$

La evaluación precisa de  $ZT$ , está lejos de ser sencilla, y se pueden aplicar varios enfoques, por ejemplo: medir  $\alpha$ ,  $K_0$  y  $R_m$  por separado y luego calcular  $ZT$  empleando (1). Sin embargo, este método resulta bastante inexacto sin un gran cuidado experimental, ya que cada error de medición para cada parámetro contribuye al error global acumulado en el valor resultante de  $ZT$  [8]. Los métodos más famosos utilizados para caracterizar los materiales y módulos termoeléctrico sobre una pequeña diferencia de temperatura son dos: el primero es el método Harman y el segundo es que las tres propiedades intrínsecas se miden de forma independiente sobre pequeñas diferencias de temperatura [9], [10]. El método original de Harman se utiliza para medir la resistividad eléctrica

$\rho = 1/\sigma$  y  $ZT$  sobre pequeñas diferencias de temperatura. Esta técnica tiene muchas variaciones y se ha aplicado tanto a módulos a granel (*bulk modules*) como a películas delgadas (*thin films*). Los inconvenientes son que solo funciona con pequeñas diferencias de temperatura y requiere condiciones de frontera adiabáticas que pueden ser difíciles de satisfacer [11]. El segundo método utiliza diferentes sistemas de medición para cada propiedad individual [12]. A menudo, las tres propiedades principales no se miden en la misma muestra o en la misma dirección. El segundo método consume mucho tiempo y ambos métodos pueden generar grandes incertidumbres en  $ZT$  [13].

En 2007 se introdujo el análisis con la capacitancia y una resistencia, ambas termoeléctricas [14].

El análisis proporcionó un modelo teórico para interpretar los resultados de baja frecuencia. En 2011 y en 2014 se introdujeron nuevos conceptos para definir la capacitancia termoeléctrica  $C_{TE}$  y la resistencia termoeléctrica  $R_{TE}$  que da cuenta del semicírculo de baja frecuencia [15], [16]. Tanto  $C_{TE}$  como  $R_{TE}$  están relacionados con los coeficientes de Seebeck y Peltier [1], [2]. La constante de tiempo definida por el producto de ambos elementos proporciona directamente la difusividad térmica. En 2017, se mostró cómo el análisis de pequeña señal se puede aplicar a la medición del desempeño de los TEM extendiendo un modelo en corriente continua al régimen dinámico, recuperando la forma de la impedancia eléctrica equivalente del sistema [17]. En el presente artículo se profundiza en el estudio de los dispositivos termoeléctricos en el dominio del tiempo y se demuestra que tanto la respuesta natural como la respuesta forzada de los TEM se relacionan con los modelos de pequeña señal para el análisis en frecuencia y con los modelos existente en corriente directa para generadores termoeléctricos empleados para interpretar las mediciones de espectroscopia de impedancia de los TEM [16], [17]. Esto con la finalidad de plantear las bases teóricas para el desarrollo de nuevos métodos de caracterización, a partir de la teoría de la respuesta forzada (perturbación rápida y lenta) y respuesta natural (ausencia de perturbación externa) de los materiales y dispositivos termoeléctrico [5], [18], [19]. La presente investigación está enmarcada dentro de la agenda 2015-2030 de la UNESCO para el desarrollo sostenible, específicamente el objetivo número 7, titulado Energía Asequible y No Contaminantes, la cual tiene como objetivo mejorar el acceso a energías limpias mediante sistemas CTI inclusivos (ODS 7) [20].

## II. DESARROLLO

Para abordar la respuesta natural o transitoria de los dispositivos termoeléctrico, es necesario hacer referencia al modelo que representa un convertidor termoeléctrico, el cual incluye los contactos térmicos no ideales [17], [19]. Para dicho modelo se pueden considerar dos escenarios principales, en el primer escenario se asume que para  $t < 0$  un módulo termoeléctrico ha estado conectado a través de contactos térmicos a dos reservorios térmicos a temperaturas constantes, uno a temperatura caliente  $T_h$  y otro a temperatura fría  $T_c$ , donde  $T_c < T_h$ ; y en el segundo escenario se asume que para  $t < 0$  un módulo termoeléctrico ha estado conectado a una fuente de voltaje de corriente continua. Por lo tanto, el primer escenario corresponde a la respuesta natural para una fuerza térmica y el segundo escenario corresponde a la respuesta natural para una fuerza eléctrica. Los contactos son caracterizados para una conductancia térmica finita y son definidas como:  $K_{hot} = 1/R_{hot}$  (conductancia térmica del contacto del lado caliente) y  $K_{cold} = 1/R_{cold}$  (conductancia térmica del contacto del lado frío), y  $K_0 = 1/R_0$  (conductancia térmica relacionada al material termoeléctrico). También como complemento, son definidas las capacitancias como:  $C_{th}$  (capacitancia del generador termoeléctrico), y  $C_{hot}$  y  $C_{cold}$  (las capacitancias térmicas de los contactos de los lados caliente y frío, respectivamente) [19].

### A. Circuito termoeléctrico sin fuentes independientes

Considérese el circuito termoeléctrico de la Fig. 1 (a) como un circuito termoeléctrico en cascada, análogo a un circuito eléctrico  $RCRCRC$  en cascada, el cual pertenece a un convertidor

termoeléctrico. Donde se asume que,  $R_0 = 1/K_0$  es la resistencia térmica del material termoeléctrico, los contactos son caracterizados para una resistencia térmica finita y son definidas como:  $R_{hot} = 1/K_{hot}$  (resistencia térmica del contacto del lado caliente) y  $R_{cold} = 1/K_{cold}$  (resistencia térmica del contacto del lado frío). El circuito termoeléctrico se excita con la energía inicialmente almacenada en el capacitor termoeléctrico  $C_{th}$  y los capacitores térmicos  $C_{hot}$  y  $C_{cold}$ . Tal energía está representada por la suma de la temperatura inicial del capacitor térmico del lado caliente  $\Delta T_{C_{hot}}$ , la temperatura inicial del capacitor térmico del lado frío  $\Delta T_{C_{cold}}$  y la temperatura del capacitor termoeléctrico  $\Delta T_{C_{th}}$ . En  $t = 0$ , se abre el interruptor  $sw$  que interconecta la fuente de voltaje de corriente directa  $V_S u(t)$  con el circuito termoeléctrico, por lo tanto,  $T_{C_{th}}(0) = \frac{1}{C_{th}} \int_{-\infty}^0 I_{Q_{C_{th}}} dt = \Delta T_{C_{th}} = \Delta T'$ ,  $T_{C_{th}}(0) = \frac{1}{C_{th}} \int_{-\infty}^0 I_{Q_{C_{th}}} dt = \Delta T_{C_{th}} = \Delta T'$  y  $T_{C_{cold}}(0) = \frac{1}{C_{cold}} \int_{-\infty}^0 I_{Q_{C_{cold}}} dt = \Delta T_{C_{cold}}$ . Donde el diferencial de temperatura que aportan los contactos del módulo termoeléctrico está dado por  $\Delta T_C = T_{C_{hot}} - T_{C_{cold}}$ , el diferencial de temperatura al interno del módulo termoeléctrico o a través del capacitor del termogenerador es igual a  $\Delta T_{C_{th}} = \Delta T' = T_{hM} - T_{cM}$  y las corrientes térmicas tanto a través en el capacitor del generador termoeléctrico como a través de los capacitores térmicos son  $I_{Q_{C_{th}}}$ ,  $I_{Q_{C_{hot}}}$  e  $I_{Q_{C_{cold}}}$ , respectivamente. De acuerdo con la ley de Fourier, las corrientes térmicas a través de la resistencia termoeléctrica y las resistencias de los contactos térmicos del módulo termoeléctrico en función del tiempo son:  $I_{Q_{R_0}}(t) = \Delta T_{R_0}(t)/R_0$ ,  $I_{Q_{R_{hot}}}(t) = \Delta T_{R_{hot}}(t)/R_{hot}$  y  $I_{Q_{R_{cold}}}(t) = \Delta T_{R_{cold}}(t)/R_{cold}$ , respectivamente. Del circuito termoeléctrico equivalente en cascada  $R_0 C_{th} R_C C_C$  de la Fig. 1 (b), se obtiene la corriente térmica a través del dispositivo  $I_Q$ , donde  $R_C = 1/K_C$  y  $K_C = K_{hot} K_{cold} / (K_{hot} + K_{cold}) = R_{hot} + R_{cold}$ . Por lo tanto, la corriente térmica  $I_Q$  a través del TEM se puede representar como  $I_Q(t) = I_{Q_{R_C}}(t) = \Delta T_C(t)/R_C$ . Las corrientes térmicas a través de cada uno de los capacitores están dadas por  $I_{Q_{C_{hot}}}(t) = C_{hot} d[T_{C_{hot}}(t)]/dt$ ,  $I_{Q_{C_{cold}}}(t) = C_{cold} d[T_{C_{cold}}(t)]/dt$  y  $I_{Q_{C_{th}}}(t) = C_{th} d[\Delta T_{C_{th}}(t)]/dt$ . La corriente térmica a través del capacitor equivalente de los contactos térmicos  $I_{Q_{C_C}}(t) = C_C d[\Delta T_{C_C}(t)]/dt$ , se obtiene del circuito equivalente de la Fig. 1 (b), donde  $C_C = C_{hot} C_{cold} / (C_{hot} + C_{cold})$ .

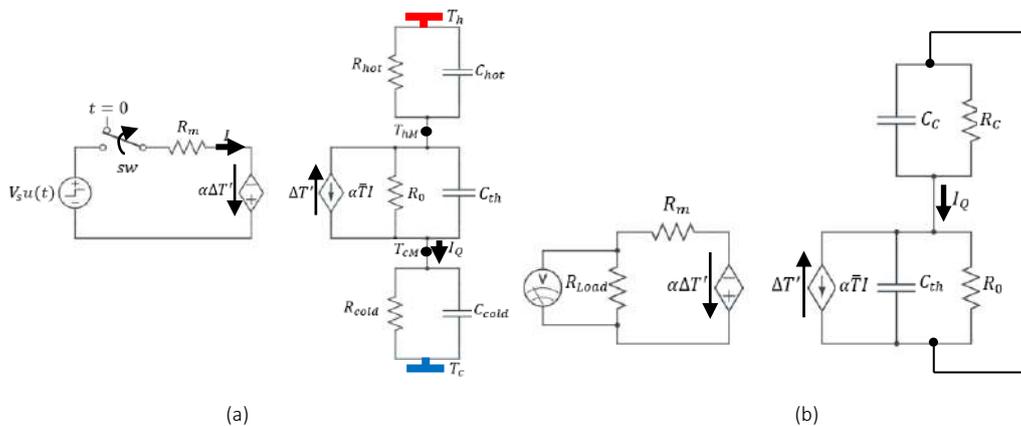


Fig. 1. Circuito termoeléctrico  $R_{hot}C_{hot}R_0C_{th}R_{cold}C_{cold}$  en cascada de un termogenerador en ausencia de fuentes externa (a). Circuito Termoeléctrico Equivalente  $R_0C_{th}R_C C_C$  en Cascada de un termogenerador en ausencia de fuentes externas (b).

Aplicando la ley de tensión de Kirchhoff (LTK) a lo largo de la malla externa del circuito termoeléctrico en cascada  $R_0C_{th}R_C C_C$  de la Fig. 1 (b), se obtienen las ecuaciones para el diferencial de temperatura en las caras del dispositivo termoeléctrico y para el diferencial de temperatura en el capacitor térmico equivalente,  $\Delta T$  y  $\Delta T_{C_C}$ , respectivamente. Entonces,  $\Delta T' + \Delta T_{C_C} = \Delta T$  y  $\Delta T_{C_C} = \Delta T - \Delta T'$ ; recordando que,  $\Delta T$  es el diferencial de temperatura entre los dos reservorios térmicos y que está definido por  $\Delta T = T_h - T_c$ . Por lo tanto, queda claro que la diferencia de temperatura visto por el termogenerador al interno del TEM cumple la siguiente igualdad  $\Delta T' = T_{hM} - T_{cM} = \Delta T - R_C I_Q$ . Puesto que el diferencial de temperatura de los capacitores no puede cambiar abruptamente, tal cual ocurre con los capacitores eléctricos, entonces se asume que  $\Delta T(0^-) = \Delta T(0^+) = \Delta T$ .

Por ende,  $R_C [I_Q(t) + I_{Q_{C_C}}(t)] + R_0 [I_Q(t) + I_{Q_{C_{th}}}(t)] = \Delta T$ . Para  $t > 0$ , el interruptor *sw* del circuito termoeléctrico de la Fig. 1 (a) se encuentra abierto y todas las fuentes independientes se encuentran apagadas; por lo tanto, se obtienen que  $\Delta T' + \Delta T_{C_C} = 0$  y  $\Delta T_{C_C} = -\Delta T_{C_{th}}(t) = -\Delta T'$ . Por lo tanto, se consigue que la ecuación  $\Delta T$  puede describir como  $R_C [I_Q(t) + I_{C_C}(t)] + R_0 [I_Q(t) + I_{C_{th}}(t)] = 0$ . Empleando la ley de corriente de Kirchhoff (LCK) se pueden obtener otras expresiones para la corriente térmica  $I_Q(t)$  a través del dispositivo; las cuales, al ser sustituidas en las expresiones de los distintos diferenciales de temperaturas, es posible determinar que la expresión matemática general que modela la respuesta natural de los TEM. Dicha expresión matemática es una ecuación de diferencial de segundo orden en función del tiempo, la cual se presenta de manera clara en (2).

$$R_C C_C R_0 C_{th} \frac{d^2[\Delta T_{C_{th}}(t)]}{dt^2} + (R_C C_C + R_0 C_{th}) \frac{d[\Delta T_{C_{th}}(t)]}{dt} + \Delta T_{C_{th}}(t) = 0 \quad (2)$$

Resolver la ecuación diferencial de segundo orden requiere que haya dos condiciones iniciales, como por ejemplo el valor inicial de  $\Delta T_{C_{th}}$  y de su primera derivada. Con las dos condiciones iniciales, se puede resolver la expresión para (2). En base a la teoría sobre circuitos eléctricos de primer orden, indica que la solución es de forma exponencial [21]. Concédase entonces escribir  $\Delta T_{C_{th}}$  como en (3), donde  $A$  y  $s$  son constantes por determinar. De la sustitución de (3) en (2) y de la realización de las derivaciones necesarias se obtiene (4).

$$|\Delta T_{C_{th}}| = |-\Delta T_{C_C}| = |Ae^{st}| \quad (3)$$

$$Ae^{st} \left[ s^2 + \left( \frac{R_C C_C + R_0 C_{th}}{R_C C_C R_0 C_{th}} \right) s + \left( \frac{1}{R_C C_C + R_0 C_{th}} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

$$s^2 + \left( \frac{R_C C_C + R_0 C_{th}}{R_C C_C R_0 C_{th}} \right) s + \left( \frac{1}{R_C C_C + R_0 C_{th}} \right) = 0 \quad (5)$$

Puesto que la supuesta solución que se intenta hallar es  $\Delta T_{C_{th}} = Ae^{st}$ , entonces sólo la expresión entre corchetes en (4) puede ser cero. En la ecuación (5) se tiene una ecuación cuadrática y se conoce como ecuación característica de la ecuación diferencial (2), ya que sus raíces dictan el carácter de  $\Delta T_{C_C}$  y  $\Delta T_{C_{th}}$ . Las formas compactas y notables de expresar las raíces de (5) son:

$s_1 = -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$  y  $s_2 = -\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$ . Las raíces  $s_1$  y  $s_2$  se denominan frecuencias

naturales, medidas en Nepers por segundo (Np/s), porque se asocian con la respuesta natural del dispositivo termoeléctrico, donde  $j = \sqrt{-1}$  y  $\omega_d = \sqrt{(\omega_0^2 - \beta^2)}$ , la cual se llama frecuencia de amortiguamiento,  $\omega_0$  se llama frecuencia resonante del módulo termoeléctrico, o más estrictamente frecuencia natural no amortiguada de los TEM y la frecuencia asociada a los contactos térmicos y es llamada  $\omega_1$ . Las frecuencias angulares termoeléctricas características emanan de las raíces como  $\omega_1 = \beta = (R_C C_C + R_0 C_{th})/2R_C C_C R_0 C_{th}$  y  $\omega_0 = 1/\sqrt{2R_C C_C R_0 C_{th}}$  [14], [15], [16], [17], [19]. Si los contactos térmicos son iguales, la razón de amortiguamiento  $\zeta$ , se obtiene a través de la siguiente expresión matemática

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_0} \left( \frac{\omega_0^2 + \omega_1^2}{\omega_1} \right) \quad (6)$$

En términos de  $\omega_1$  y  $\omega_0$ , puede escribirse (5) como  $s^2 + 2\omega_1 s + \omega_0^2 = 0$ . Los dos valores de  $s$  indican que hay dos posibles soluciones para  $\Delta T_{C_C}$ , cada una de las cuales es de la forma de la supuesta solución en (3); es decir,  $\Delta T_{C_{cold}}(t) = A_1 e^{s_1 t}$  y  $\Delta T_{C_{hot}}(t) = A_2 e^{s_2 t}$ . Como la expresión matemática (2) es una ecuación lineal, cualquier combinación lineal de las dos distintas soluciones  $\Delta T_{C_{cold}}$  y  $\Delta T_{C_{hot}}$  también es una solución de (2). Una solución completa de (2) requeriría por lo tanto una combinación lineal de  $\Delta T_{C_{cold}}$  y  $\Delta T_{C_{hot}}$ . Así, la respuesta natural puede expresarse en función de los contactos térmicos como en (7), donde las constantes  $A_1$  y  $A_2$  se determinan a partir de los valores iniciales de  $\Delta T_{C_{th}}(0)$  y  $d\Delta T_{C_{th}}(0)/dt$ , o a partir de los valores iniciales de  $\Delta T_{C_C}(0)$  y  $d\Delta T_{C_C}(0)/dt$ . Esto demuestra que la respuesta natural de un módulo termoeléctrico expresada en temperatura, es una caída exponencial de la temperatura inicial, y obedece a la ley de enfriamiento de Newton [22]. También se demuestra que la respuesta natural de un módulo termoeléctrico expresada en voltaje, es una caída exponencial del voltaje de Seebeck y cumple con la teoría de circuitos eléctricos de primer y segundo orden [19], [21].

$$\Delta T_{C_C}(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \quad (7)$$

La constante de tiempo asociada a la capacitancia de los contactos térmicos se denominará  $\tau_C = 1/\beta = 1/\omega_1$ . Por lo tanto, de la respuesta natural es posible obtener la constante de tiempo asociada a la capacitancia de los contactos del TEM [14], [15], [16], [17], [19]. Para el caso donde el contacto del lado frío es igual al contacto del lado caliente, la constante de tiempo  $\tau_C$  se obtiene experimentalmente a partir de la medición de temperatura en la cara del lado frío del dispositivo y se determina considerando que la amplitud se aumenta en un factor  $1/e$  (36.8 % de la amplitud que disfrute), entonces  $\tau_C = R_C C_C = \tau_{C_{cold}} = 1/\beta_C = 1/\omega_1$ . El capacitor asociado al contacto térmico del lado frío del módulo, tarda  $5\tau_C$  en llegar a su estado final, también conocido como tiempo de relajación (*relaxation time*). La constante de tiempo asociada a la capacitancia del material termoeléctrica al interno del módulo  $\tau_{th} = 1/\omega_{th}$  podría obtenerse a un tiempo ligeramente mayor a la esperada, para lo cual se considera el caso de un circuito termoeléctrico sobreamortiguado cuando  $\beta < \omega_0$ . Tanto  $\omega_0$  como  $\omega_d$  son frecuencias naturales, porque contribuyen a determinar la respuesta natural del módulo termoeléctrico; mientras que  $\omega_0$  suele

llamarse frecuencia natural no amortiguada,  $\omega_d$  se llama frecuencia natural amortiguada o frecuencia de desplazamiento. Y el tiempo de relajación asociado a la capacitancia del material termoeléctrico al interno del módulo se obtiene a  $5\tau_{th}$ . La respuesta natural respecto al material termoeléctrico se define por medio de la ecuación (8).

$$\Delta T_{C_{th}}(t) = e^{-\beta_{th}t}(A_1 \cos \omega_d t + A_2 \text{sen } \omega_d t) \quad (8)$$

Con la presencia de las funciones seno y coseno es trivial que la respuesta natural para este caso está amortiguada exponencialmente y es de naturaleza oscilatoria. Tal respuesta tiene una constante de tiempo asociada a la capacitancia termoeléctrica  $\tau_{th}$  y un periodo de  $T = 2\pi/\omega_d$ , y como la amplitud se reduce en un factor  $1/e$  (a un 36.8 % de la que gozara), tenemos entonces dos escalas de tiempo:  $T$  nos mide el tiempo que tarda en oscilar y  $\tau_{th}$  el tiempo que tarda en amortiguarse [21]. El cociente adimensional se representa como  $\tau_{th}/T = \omega_d/2\pi\beta_{th}$ . El tiempo que tarda en decaer la amplitud del diferencial de temperatura  $\Delta T$  entre las caras del TEM nos los da la constante de tiempo  $\tau_{th}$  y está dada por  $\tau_{th} = R_0 C_{th} = 1/\beta_{th}$ . De la cual se obtiene una expresión para la frecuencia angular característica relaciona al material termoeléctrico entre los contactos, la cual se conoce como  $\omega_{th}$ , y está dada por la siguiente expresión matemática  $\omega_{th} = 2\pi\beta_{th} = 2\pi/\tau_{th}$ .

### III. METODOLOGÍA

#### A. Caracterización y figura de mérito

De la respuesta natural se obtiene  $R_C$ , escribiendo (7) como en (9). La ecuación (9) muestra que  $\Delta T_{C_C}$  es el resultado de la contribución de temperatura de cada capacitor térmico, y  $R_C$  es el resultado de la suma de las resistencias térmicas de los contactos. Por lo tanto, se aborda la ecuación (7) considerando adicionalmente que en  $t = 0$ ,  $A_1 = \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_{C_{cold}}$  y  $A_2 = \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_{C_{hot}}$ , donde  $I_{TEG_{sc}}$  es la corriente de corto circuito del módulo en modo termogenerador; es decir, la carga conectada al termogenerador es de cero ohmios. Por ende, para  $R_{Load} = 0$ , entonces  $I_{TEG_{sc}} = V_\alpha/R_m$ .

$$\Delta T_{C_C}(t) = \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_{C_{cold}} e^{s_1 t} + \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_{C_{hot}} e^{s_2 t} \quad (9)$$

Assumiendo que las resistencias térmicas correspondientes a los contactos son iguales,  $R_{C_{cold}} = R_{C_{hot}}$ , que la resistencia equivalente de los contactos es  $R_C = R_{C_{cold}} + R_{C_{hot}} = 2R_{C_{cold}}$ ,  $A_1 = A_2$  y el valor mínimo de temperatura en el contacto térmico del lado frío  $T_{C_{cold}}$  se obtiene a en  $t = 0$ ; entonces, es posible demostrar fácilmente que  $R_C$  se obtiene por medio de la siguiente ecuación

$$R_C = \frac{T_{C_{cold}}}{\alpha \bar{T} (V_\alpha/R_m)} \quad (10)$$

La conductancia térmica del módulo termoeléctrico  $K_0$  se obtiene de la respuesta natural, a partir del diferencial de temperatura en las caras del módulo  $\Delta T$ , usando la ecuación (8). Considerando que, a  $t = 0$  se obtiene el valor máximo del diferencial de temperatura  $\Delta T$ , y

$A_1 = A_2 = \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_0$ ,  $\text{sen } \omega_d t = 0$  y  $\text{cos } \omega_d t = 1$ ; es decir, que un término de (8) no contribuye al diferencial de temperatura  $\Delta T_{C_{th}}(t)$ , entonces la relación para (8) se reduce y por lo tanto se tiene que  $\Delta T_{C_{th}}(t) = \Delta T - T_{C_{cold}} = \alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}} R_0$ . Despejando y sustituyendo expresiones, se obtiene la ecuación (11).

$$R_0 = \frac{\Delta T_{C_{th}}(t)}{\alpha \bar{T} I_{TEG_{sc}}} = \frac{\Delta T - T_{C_{cold}}}{\alpha \bar{T} (V_\alpha / R_m)} = \frac{\Delta T - T_{C_{cold}}}{\alpha^2 \bar{T} (\Delta T / R_m)} \quad (11)$$

Por consiguiente, utilizando la identidad de  $R_0 = K_0^{-1}$  y  $V_\alpha = \alpha \Delta T$ , se obtiene la ecuación (12) para representar el coeficiente  $K_0$ . Donde  $R_m = (V_{max} / I_{max}) [(T_{hot} - \Delta T_{max}) / T_{hot}]$ .

$$K_0 = \frac{\alpha^2 \bar{T} (\Delta T / R_m)}{\Delta T - T_{C_{cold}}} \quad (12)$$

La conductancia térmica también se puede obtener a partir de la impedancia termoeléctrica realizando un análisis en el dominio de la frecuencia, a través del gráfico de Nyquist para impedancia compleja, usando (13), la cual corresponde a la expresión de la impedancia compleja  $Z_{th}$ , dado que las constantes de tiempo  $\tau_0$ ,  $\tau_1$  y  $\tau_{th}$  son inversamente proporcionales las frecuencias angulares  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  y  $\omega_{th}$ , respetivamente. Y como la resistencia termoeléctrica equivalente  $R_{TE}$  se obtiene de la respuesta forzada, entonces

$$Z_{th} = R_{TE} \frac{1 + j\omega / \omega_1}{1 + 2\zeta j\omega / \omega_0 + (j\omega / \omega_0)^2} \quad (13)$$

La figura de mérito se calcula empleando (1). Sin embargo, sustituyendo (12) en (1), se consigue que la figura de mérito está dada también por la siguiente ecuación matemática (13).

$$ZT = \frac{\Delta T - T_{C_{cold}}}{\Delta T} \quad (14)$$

Descomponiendo la ecuación (14) obtenida por medio de la respuesta natural se consigue una nueva ecuación para la figura de mérito  $ZT$  y está dada por la ecuación (15).

$$ZT = 1 - \frac{T_{C_{cold}}}{T_{C_{hot}} - T_{C_{cold}}} \quad (15)$$

El segundo término del miembro derecho de la ecuación (15) corresponde con la expresión obtenida por Ioffe para medir el desempeño máximo  $\epsilon_{max}$  de los TEM,  $\epsilon_{max} = T_1 / (T_0 - T_1)$ . La expresión matemática de la figura de mérito encontrada a través de la teoría aquí propuesta; es decir, la ecuación (14), tiene la forma recíproca de la ecuación de Harman, pero la ecuación de Harman está expresada en función de voltajes  $ZT = V_{oa} / (V_{ia} - V_{oa})$ . Los métodos anteriormente propuestos pueden ser aplicados para todas las configuraciones planteadas por

Harman. Para el caso donde la configuración contemple un dissipador de calor (*Heat Sink, HS*), tal que la temperatura del lado caliente se fije a la temperatura ambiente, entonces  $T_{C_{cold}} = T_{amb} - [(T_{h_{No HS}} - T_{amb}) + T_{c_{HS}}]$ .

IV. RESULTADOS

A. Resultados de la simulación

Para ilustrar la respuesta natural de los módulos termoeléctricos, se considera como muestra un módulo termoeléctrico comerciable, específicamente el Kryotherm TB-127-1.4-1.2, usado por Lineykin and Ben-Yaakov [3]; así como también empleado por Y. Apertet y H. Ouerdane [17]. Los parámetros del módulo Kryotherm TB-127-1.4-1.2 a  $\Delta T = 70 K$  se pueden encontrar en [23].

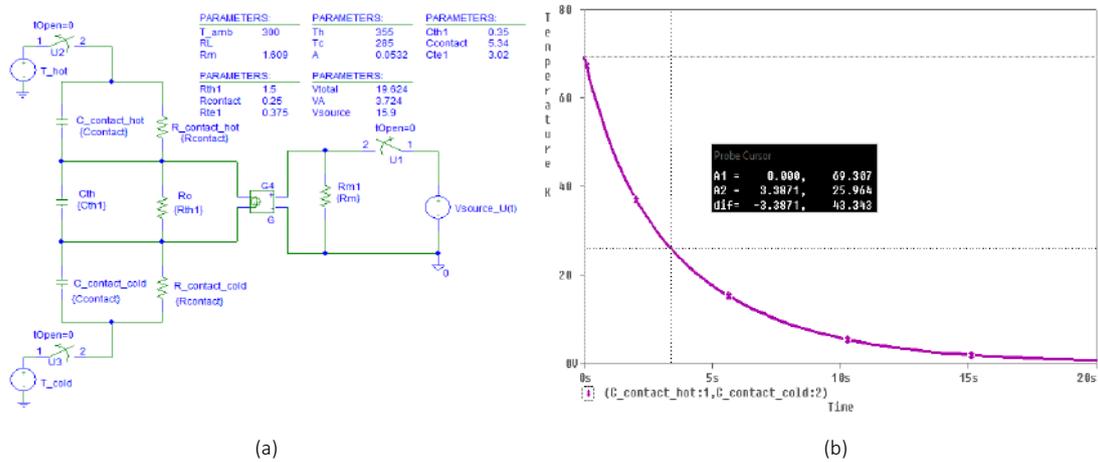


Fig. 2. Simulación de la respuesta natural en PSpice del circuito termoeléctrico  $R_{hot}C_{hot}R_oC_{th}R_{cold}C_{cold}$  en cascada de un termogenerador TEM en ausencia de fuente externa (a). Simulación de la Respuesta Natural del TEM en PSpice. La constante de tiempo  $\tau_{th} = 3,387 s$  y se obtiene a partir de  $\Delta T$  aproximadamente a 36,8 % de su valor inicial (b).

La simulación de la respuesta natural del TEM se realizó por medio del simulador PSpice (*Orcad Family Release 9.2 Standalone*). En la Fig. 2 (a) se presenta el circuito termoeléctrico  $R_{hot}C_{hot}R_oC_{th}R_{cold}C_{cold}$  en cascada de un termogenerador TEM sin fuentes independientes. También es posible emplear otros modelos de circuito equivalente compatible en PSpice para análisis y simulación módulos termoeléctricos como los presentados en [3]. La Fig. 2 (b) muestra el diferencial de temperatura  $\Delta T$  en las caras del módulo termoeléctrico y se obtiene a partir de la respuesta natural, donde la constante de tiempo obtenida es  $\tau_{th} = 3,387 s$ . La constante de tiempo  $\tau_{th}$ , también puede obtener a partir del potencial eléctrico entre los terminales positivo (+) y negativo (-) del TEM, es decir, a partir del voltaje de Seebeck, el cual está dado por  $V_{\alpha} = \alpha \Delta T$ . Por lo tanto, considerando que la respuesta natural concierne al capacitor termoeléctrico presenta una respuesta subamortiguada, entonces la frecuencia angular del material termoeléctrico se obtiene de la expresión  $\omega_{th} = 2\pi/\tau_{th} = 1,854 rad/s$ .

**B. Resultados experimentales**

Para la demostración experimental se ha empleado la configuración suspendida, como se muestra en la Fig. 3 (a); sin embargo, es posible emplear cualquiera de las configuraciones propuesta por Harman en [9]. Para la configuración con disipador (*Heat Sink, HS*), se debe realizar la conversión para la temperatura  $T_{C_{cold}}$ , como se expuso en la sección III.

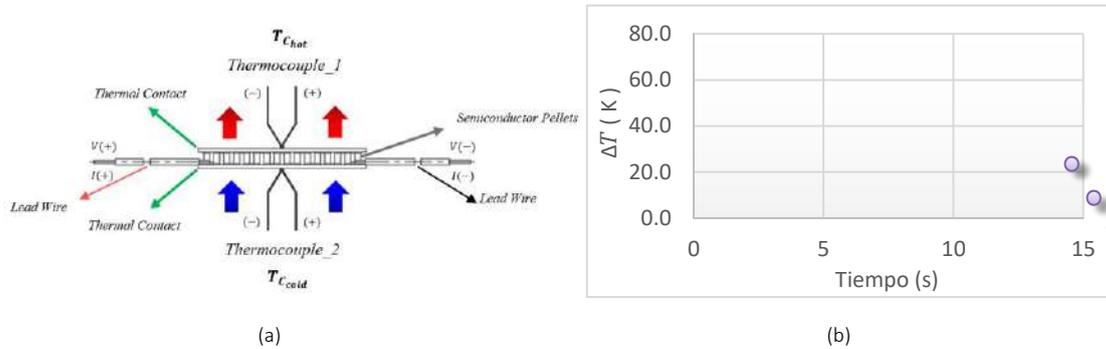


Fig. 3. Módulo termoelectrico en configuración suspendida y en condiciones no adiabáticas. Puntos de conexiones para el proceso de caracterización del módulo TB-127-1.4-1.2 [23]. Dimensiones: 40mm x 40mm x 3,5mm (a). Respuesta natural del TEM. Diferencial de temperatura  $\Delta T$  en las caras del módulo termoelectrico. La constante de tiempo  $\tau_{th} = 3,304$  s (b).

**C. Respuesta Natural**

Las Fig. 3 (b) y Fig. 4 (a), corresponden a las mediciones del diferencial de temperatura  $\Delta T$  en las caras del dispositivo y del voltaje de Seebeck  $V_\alpha$  entre los terminales positivo (+) y negativo (-) del TEM, respectivamente. La constante de tiempo  $\tau_{th} = 3,304$  s y se obtiene a 36,8% del valor inicial de  $\Delta T$  o  $V_\alpha$ . Por lo tanto, considerando que la respuesta natural concierne al capacitor termoelectrico presenta una respuesta subamortiguada, entonces la frecuencia angular del material termoelectrico se obtiene de la expresión  $\omega_{th} = 2\pi/\tau_{th} = 1,901$  rad/s. La constante de tiempo  $\tau_c$  se obtiene experimental a partir de la medición de temperatura en la cara del lado frio del dispositivo y se determina considerando que la amplitud aumenta en un factor  $1/e$  (36,8% del valor inicial) como se muestra en la Fig. 4 (b). La frecuencia angular asociada a los contactos térmicos es  $\omega_1 = 1/\tau_c = 0,729$  rad/s.

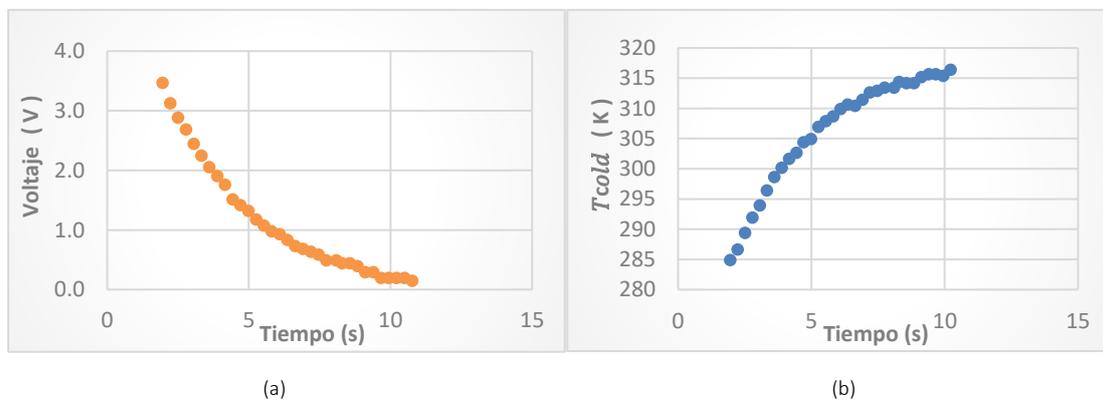


Fig. 4. Respuesta natural del TEM en modo generador. Voltaje de Seebeck  $V_\alpha$  total medido durante la respuesta natural. La constante de tiempo  $\tau_{th} = 3,304$  s (a). Respuesta natural del TEM. Temperatura  $T_{cold}$  en el contacto térmico del lado frio del TEM. La constante de tiempo  $\tau_c = 1,370$  s (b).

De los resultados experimentales, se puede emplear cualquiera de las ecuaciones propuestas en la sección III, considerando que en  $t = 0$ , tanto  $T_{C_{cold}}$  como  $T_{C_{hot}}$  deben ser igual a  $300K$ ; es decir, se debe corregir el error de *offset* de temperatura para cada termocupla. Lo que permite obtener los resultados expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del Módulo Kryotherm TB-127-1.4-1.2. PARA  $\Delta T = 69,25 K$ ,  $\bar{T} = 300K$ ,  $V_{max} = 15,9 V$ ,  $I_{max} = 7,6 A$ ,  $R_{ac}(295K) = 1,5 \Omega$  (Tolerancia: +/- 10%),  $Q_{max} = 75 W$  [23].

| $R_m(\Omega)$ | $K_0 (W \cdot K^{-1})$ | $C_{th}(J \cdot K^{-1})$ | $\alpha (V \cdot K^{-1})$ | $ZT$   |
|---------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|--------|
| 1,592         | 0,639                  | 0,336                    | 0,0508                    | 0,7617 |

Los resultados experimentales presentados en la Tabla I corresponden a la caracterización del módulo TEM Kryotherm, TB-127-1.4-1.2, para un  $\Delta T = 69,25 K$  aproximadamente, en configuración suspendida y en condiciones no adiabáticas, donde el ambiente o reservorio al cual están expuestos los contactos térmicos de módulo está a una temperatura ambiente de  $\bar{T} = 300K$ . Para las mediciones de temperatura fueron empleadas dos termocuplas de tipo K especiales, con un error (*Special Limits Error*) de  $\pm 1,1 ^\circ C$  o  $\pm 0,4 \%$ . Para el proceso de mediciones de temperatura, voltaje y corriente, se implementó un sistema de medición de temperatura y voltaje integrado, de alta resolución y velocidad, controlado por computadora, que es capaz de resolver con precisión los componentes de temperatura y voltaje. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla I y pueden ser cotejados con los resultados publicados en [3], [17], [19], [23], el cual corresponden a un  $\Delta T = 70 K$ . La estimación de errores con respecto a los resultados publicados en [3], [17], [19], [23], asociados al *offset* y *time step* arrojó que, para la conductancia térmica el error absoluto es  $0,038 W \cdot K^{-1}$  y el error relativo es  $5,6 \%$ , para la figura de mérito el error absoluto es  $0,034$  y el error relativo es  $4,7 \%$ . Y la estimación de errores en comparación con la metodología de la respuesta forzada arrojó que, para la conductancia térmica el error absoluto es  $0,006 W \cdot K^{-1}$  y el error relativo es  $0,9 \%$ , para la figura de mérito el error absoluto es  $0,007$  y el error relativo es  $0,9 \%$  [19].

## CONCLUSIONES

La respuesta natural de los materiales y módulos termoelectricos puede obtenerse tanto del efecto Peltier como del efecto Seebeck. La fórmula  $ZT$  obtenida a través de la respuesta natural se expresa en función de las temperaturas y se refiere a la figura de mérito de los TEM cuando se utilizan como refrigeradores termoelectricos, mientras que la ecuación obtenida por Harman se expresa en función de los voltajes y se refiere a la figura de mérito de los TEM cuando se utilizan como generadores termoelectricos. Además, permite determinar las constantes de tiempo relacionadas con los contactos térmicos  $\tau_1$ , con el material termoelectrico  $\tau_{th}$  y la constante de tiempo  $\tau_0$  que está directamente relacionada con la frecuencia natural. También, permite determinar los tiempos de relajación relacionados con los contactos térmicos y el material termoelectrico se encontraron  $5\tau_C$  y  $5\tau_{th}$ , respectivamente. Adicionalmente, es posible obtener

---

información requerida para estudios en el dominio de la frecuencia, como el factor de amortiguamiento  $\zeta$ . Por lo tanto, tras los resultados obtenidos de los análisis matemáticos, termoeléctricos, simulación PSpice y experimentos, se demuestra que, a partir de la teoría de la respuesta natural en combinación con la respuesta forzada de los TEM, se cuentan con los modelos matemáticos y evidencias para el desarrollo de un nuevo método para la caracterización de módulos y materiales termoeléctricos.

## REFERENCIAS

- [1] T. J. Seebeck, «Magnetic polarization of metals and minerals,» *Abhandlungender Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, vol. 265, 1822-1823.
- [2] J. C. Peltier, «Nouvelles experiences sur la caloricite des courans electrique,» *Annales de Chimie et de Physique*, vol. LVI, pp. 371-386, 1834.
- [3] S. Lineykin y S. Ben-Yaakov, «Modeling and analysis of thermoelectric modules,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, nº 2, pp. 505-512, 2007.
- [4] D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*, Boca Raton: Taylor & Francis, 1995, pp. 192-212.
- [5] V. Zlatic y R. Monnie, *Modern Theory of Thermoelectricity*, New York: Oxford University Press, 2014.
- [6] S. LeBlanc, S. K. Yee, M. L. Scullin, C. Dames y K. E. Goodson, «Material and manufacturing costconsiderations for thermoelectrics,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 313-327, 2014.
- [7] A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Refrigeration*, London: Infosearch, 1957.
- [8] H. Wang, S. Bai, L. Chen, A. Cuenat, G. Joshi, H. Kleinke, J. König, H. W. Lee, J. Martin, M. W. Oh y W. D. Potter, «International round-robin study of the thermoelectric transport properties of an n-Type half-Heusler compound from 300 K to 773 K,» *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, nº 11, pp. 4482-4491, 2015.
- [9] T. C. Harman, «Special techniques for measurement of thermoelectric properties,» *Journal of Applied Physics*, vol. 29, nº 9, pp. 1373-1374, 1958.

- 
- [10] H. Iwasaki, M. Koyano y H. Hori, «Evaluation of the figure of merit on thermoelectric materials by Harman method,» *Japanese journal of applied physics*, vol. 41, nº 11R, p. 6606, 2002.
- [11] R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts y B. O'quinn, «Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit.,» *Nature*, vol. 413, nº 6856, pp. 597-602, 2001.
- [12] J. Cape y G. W. Lehman, «Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity,» *Journal of applied physics*, vol. 34, nº 7, pp. 1909-1913, 1963.
- [13] G. Min y D. M. Rowe, «A novel principle allowing rapid and accurate measurement of a dimensionless thermoelectric figure of merit,» *Measurement Science and Technology*, vol. 12, nº 8, p. 1261, 2001.
- [14] A. D. Downey, T. P. Hogan y B. Cook, «Characterization of thermoelectric elements and devices by impedance spectroscopy,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, nº 9, p. 093904, 2007.
- [15] A. De Marchi y V. Giaretto, «An accurate new method to measure the dimensionless figure of merit of thermoelectric devices based on the complex impedance porcupine diagram,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, nº 10, p. 104904, 2011.
- [16] J. García-Cañadas y G. Min, «Impedance spectroscopy models for the complete characterization of thermoelectric materials,» *Journal of Applied Physics*, vol. 116, nº 17, p. 174510, 2014.
- [17] Y. Apertet y H. Ouerdane, «Small-signal model for frequency analysis of thermoelectric systems,» *Energy Conversion and Management*, vol. 149, pp. 564-569, 2017.
- [18] J. M. Luttinger, «Theory of thermal transport coefficients,» *Physical Review*, vol. 135, nº 6A, p. A1505, 1964.
- [19] R. E. Pirela y S. R. Velásquez, «Forced Response of Thermoelectric Materials and Devices,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, nº 8, 2022.
- [20] UNESCO, «UNESCO moving forward the 2030 Agenda for Sustainable Development,» United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, France, 2017.
- [21] C. K. Alexander y M. N. Sadiku, *Fundamentals of electric circuits*, vol. 4, New York: McGraw-Hill, 2009.

---

[22] Anonymous, «Scala graduum Caloris. Calorum Descriptiones & signa,» *Philosophical Transactions*, vol. 270, nº 22, p. 824–829, 1701.

[23] Kryotherm Co., «Thermoelectric coolers for industrial applications - Standard single stage thermoelectric coolers: TB-127-1.4-1.2.,» *Kryotherm Co., products, online. Available: <http://www.kryotherm.ru>*, p. 1, 2021.

## LOS AUTORES:



**Ronald Edgar Pirela La Cruz**, es graduado en Ingeniería Electrónica en la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO) en 2007, Especialización en Telecomunicaciones Digitales en UNEXPO en 2013, Maestría en Ingeniería Electrónica en UNEXPO en 2020. Actualmente es Doctorante en el Programa de Doctorado en Ciencia de la Ingeniería en la UNEXPO. Al presente, es el Ingeniero de Validación en el Laboratorio de Trenes a Hidrogeno, Alstom Ferroviaria S.p.A., Savigliano, Italia, (e-mail: [repirelalc@estudiante.unexpo.edu.ve](mailto:repirelalc@estudiante.unexpo.edu.ve)).



**Sergio Rafael Velásquez Guzmán** - Coautor, es graduado en Ingeniería Electrónica en la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" en 2008, Maestría en Educación en el UPEL en 2011, Maestría en Ingeniería Electrónica en UNEXPO en 2012, Maestría en Gerencia de las Finanzas y los Negocios, UNY en 2014, Doctor en Educación 2015, Doctor en Ciencias de la Ingeniería en la UNEXPO en 2019. En la actualidad, él es Profesor Adscrito al Departamento de Investigación y Postgrado de la UNEXPO y el Coordinador del Centro de Investigación de las Redes Neuronales Artificiales y La Robótica, Profesor Investigador B, avalado por el MINCYT.

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}$$

$$(1 + x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots$$

Published by:

