



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
Instituto de Ingeniería y Tecnología



# CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Revista de investigación en ingeniería e  
innovación tecnológica

ISSN 2007-0411

Volumen 19 | Número 1  
Enero-Abril 2022

DOI: 10.20983/culcyt.2022.1





# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

## DIRECTORIO:

**Mtro. Juan I. Camargo Nassar**  
RECTOR

**Dr. Daniel Constandse Cortez**  
SECRETARIO GENERAL

**Dr. Juan F. Hernández Paz**  
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

**Mtro. Jesús Meza Vega**  
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA

**Dra. Nelly Gordillo Castillo**  
COORDINADORA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL IIT



## CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Revista de investigación en ingeniería e innovación tecnológica | ISSN 2007-0411

### COMITÉ EDITORIAL 2019-2022

**Dra. Nelly Gordillo Castillo**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
Editora en Jefe

**Mtro. Raúl Alfredo Meza González**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
Coordinador Editorial

**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**Dr. Ramón Gerardo Guevara González**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

**Dra. Klavdia Oleschko Lutkova**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**Dr. Abdiel Ramírez Reyes**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

**Dra. Santos Adriana Martel Estrada**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

**Dr. David Cortés Sáenz**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

**Dr. David Ortega Gaucin**  
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.

**CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA**, vol. 19, núm. 1, enero-abril 2022, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología. D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Teléfono +52 (656) 6884848. Sitio OJS: [erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt](https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt). Correo electrónico: [culcyt@uacj.mx](mailto:culcyt@uacj.mx). Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo. Reserva de derecho al uso exclusivo No. 04-2021-060118164700-203, ISSN (electrónico) 2007-0411, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

DOI: 10.20983/culcyt.2022.1

El acceso a la revista CULCYT. Cultura Científica y Tecnológica es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



# CONTENIDO

## CONTENTS

### Artículos de investigación

¿Qué debe saber, hacer y ser el diseñador industrial de la UACJ del mañana? **I 1-7**  
*What should the UACJ industrial designer of tomorrow know, do and be?*

Aprendizaje de Procedimientos Básicos de Enfermería a través de una Estrategia Interactiva Digital **II 1-5**  
*Learning Basic Nursing Procedures through a Digital Interactive Strategy*

Smart architecture for software-defined networking **III 1-9**  
*Arquitectura inteligente para redes definidas por software*

### Artículos de revisión

Uso de KDSM para la Gestión de Conocimiento en el Ámbito de la TEC **IV 1-6**  
*Using KDSM to Knowledge Management in ECT Domain*

Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19 **V 1-17**  
*Considerations in designing robots for healthcare in the post COVID-19 world*

Amortiguadores regenerativos para sistemas de suspensión **VI 1-20**  
*Regenerative shock absorbers for automotive suspension systems: A review*

# ¿Qué debe saber, hacer y ser el diseñador industrial de la UACJ del mañana?

*What should the UACJ industrial designer of tomorrow know, do and be?*

Marlen Castellanos-Uralde<sup>1</sup>✉, Claudia Almaraz-Córdova<sup>1</sup>, Raúl Alejandro Ríos-Alonso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

## RESUMEN

Las carreras de Diseño Industrial, internacionalmente, se construyen sobre el dominio de habilidades por parte del estudiante que están respaldadas por conocimientos y cuyo ejercicio implica una extrema sensibilidad y valores humanos. En Ciudad Juárez, Chihuahua, México, la investigación titulada “Sistema de Competencias Profesionales para el Diseñador Industrial en la UACJ Visión 2030”, de la cual forman parte los autores del presente artículo, se realiza en el marco de la preparación para la reacreditación de esta, como parte de la evaluación institucional. El objetivo de la presente propuesta es arrojar un directorio con interconexiones sistémicas que funcione, en última instancia, como herramienta de trabajo y orientación para estudiantes, profesores y directivos. Este artículo muestra las habilidades, capacidades y valores detectados como parte del estudio teórico llevado a cabo por los autores acerca de las competencias profesionales a ser desarrolladas por el estudiante de Diseño Industrial que egrese de la UACJ, con visión a 2030. Las competencias profesionales se presentan en forma de sistema, estructurado en elementos y unidades, que incluyen los conocimientos, las habilidades y el sistema de valores para la formación de los diseñadores industriales. Las indagaciones empíricas realizadas por los autores de esta investigación, en el diagnóstico del estado actual, a través de entrevistas, encuestas y el análisis documental, permiten corroborar la necesidad de la identificación del sistema de competencias.

**PALABRAS CLAVE:** competencias; profesional; habilidad; población; formación.

## ABSTRACT

The build of Industrial Design careers around the world use as principle, the creation of skills in students that has been back with knowledge and extreme sensitivity and human values. In Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico, the research entitled “System of professional skills for the Industrial Designer at the UACJ Vision 2030”, of which the authors are part, is carried out in the framework of the preparation for the re-accreditation of the degree in Industrial Design, as part of the institutional evaluation. Our investigation aims to create a directory with systemic interconnections, which ultimately functions as a work and guidance tool for students, teachers and managers. This article shows skills, capacities, and values detected as part of the theoretical study carried out on the professional competencies to be develop by the Industrial Designer graduated from the UACJ with a vision for 2030. The professional competences are presented as a system, structured in elements and units, which include knowledge, skills, and a value system for the training of industrial designers. Inquiries made in the problem diagnosis, show up the importance of this proposal in the actual context and these results will be evaluated by expert judgments.

**KEYWORDS:** competences; professional; skill; population; formation.

### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Marlen Castellanos Uralde  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte (IADA)  
**DIRECCIÓN:** Av. del Charro 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** marlen.castellanos@uacj.mx

**Fecha de recepción:** 29 de abril de 2021. **Fecha de aceptación:** 1 de febrero de 2022. **Fecha de publicación:** 25 de febrero de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación constituye una declaración de intenciones y demostración de potencialidades de la Licenciatura en Diseño Industrial de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) en la proyección hacia la formación basada en competencias profesionales. En todo caso, el resultado obtenido permite sentar una base investigativa sobre la cual pudiera generarse una futura declaración oficial de estructura curricular basada en competencias profesionales.

La propuesta de los autores, dada a conocer como resultado de fin de cursos de la Maestría en Diseño y Desarrollo del Producto en la UACJ en 2020, de un Sistema de Competencias Profesionales, contribuirá a que la propuesta académica de la Licenciatura en Diseño Industrial de la UACJ responda a las aspiraciones de la agenda hacia 2030 con ajuste a las teorías sobre las competencias profesionales <sup>[1]</sup>.

Como antecedente y justificación, se cita de manera global lo siguiente:

- Existen avanzadas teorías sobre la formación por competencias en el ámbito laboral y académico <sup>[2]</sup>.
- La globalización demanda la posesión de conocimientos profesionales cambiantes y capacidad de adaptación <sup>[3]</sup>.
- “Las producciones de la noósfera, como los diseños curriculares, los libros de texto, lineamientos para profesores, materiales didácticos, etc., condicionan fuertemente las características y hasta la naturaleza del saber que debe ser enseñado en el aula y del que efectivamente la escuela enseña, como resultado de su interpretación” <sup>[4]</sup>.
- Se han dado debates sobre las funciones de la escuela como institución social.
- Se carece de una declaración de competencias a formar en los estudiantes de la UACJ.

La enseñanza en todos los niveles, pero especialmente en el superior, requiere de una actualización y revisión constante, pues debe adecuarse a las características específicas del mundo laboral, a las variaciones de corte social y gubernamental, a los avances científico-tecnológicos e incluso al crecimiento de las ciudades. El desarrollo exponencial de la tecnología en un futuro cercano, con efectos en todas las áreas de la sociedad, implica que las Instituciones de Educación Superior (IES) se adapten a las nuevas demandas <sup>[5]</sup>.

Por todos los datos compilados, desde la declaración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas, el calendario para su cumplimiento de México y las aspiraciones en el aumento de su nivel de cualificación, las expectativas de la UACJ en su agenda de trabajo 2030 (Modelo Educativo Universidad Autónoma de Ciudad Juárez entre los años 2020 y 2030) <sup>[6]</sup> y, finalmente, por los procesos de re-creditación a que pretende someterse la Licenciatura de Diseño Industrial, queda justificada la pertinencia de la presente investigación y del resultado a alcanzar.

El objetivo 4.4 de los ODS <sup>[7]</sup> establece, de aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de jóvenes y adultos que tienen las competencias necesarias, en particular técnicas y profesionales, para acceder al empleo, el trabajo decente y el emprendimiento. Y el objetivo 4.7 plantea, de aquí a 2030, asegurar que todos los alumnos adquieran los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para promover el desarrollo sostenible, entre otras cosas, mediante la educación para el desarrollo sostenible y los estilos de vida sostenibles, los derechos humanos, la igualdad de género, la promoción de una cultura de paz y no violencia, la ciudadanía mundial y la valoración de la diversidad cultural y la contribución de la cultura al desarrollo sostenible. Lo anterior respalda de manera explícita la importancia del resultado que se pretende obtener.

A escala más cercana, esta justificación se respalda además por las opiniones de <sup>[8]</sup>, en su artículo “Las competencias del diseñador industrial en la industria médica”.

Por último, y no menos importante, se constata una coherencia con las tareas de México para cumplir con los ODS (objetivo 4.4). Será responsabilidad de las universidades el tomar reservas con respecto al desarrollo de la enseñanza en las áreas del diseño, valiéndose de su responsabilidad de formar profesionistas con conocimientos y habilidades pertinentes de acuerdo con su disciplina y de su realidad particular <sup>[9]</sup>.

## II. METODOLOGÍA

El análisis documental y una exhaustiva revisión bibliográfica permiten detectar y describir una serie de elementos relativos a las competencias profesionales como concepto. Dicho levantamiento de información constituye la base para una investigación de marcado interés curricular para la Universidad Autónoma de

Ciudad Juárez. El resultado de tal investigación consiste en la declaración de un Sistema de Competencias Profesionales a formar en el diseñador industrial egresado de la UACJ, con base en las necesidades sociales, laborales, ambientales, tecnológicas y comunicativas que, se prevé, el profesionista requerirá en la década venidera.

Esta investigación, titulada “Sistema de competencias profesionales para el Diseñador Industrial en la UACJ Visión 2030” (de la cual forman parte los autores del presente artículo), se realiza en el marco de la preparación para la reacreditación del Programa de Licenciatura en Diseño Industrial por parte del Consejo Mexicano para la Acreditación de Programas de Diseño (COMAPROD), como parte de la evaluación institucional.

La consulta, en la que participaron los autores de este escrito, a diversos especialistas en procesos académicos como el PIDE y en la dinámica cotidiana de la universidad, permiten también detectar puntos álgidos en el proceso y en la academia, con miras a la generación de un banco potente de información que es volcado en la ya mencionada propuesta que da lugar al presente artículo.

La lectura analítica de diversos materiales, tales como libros, revistas digitales, informes de investigaciones, planes de estudio y documentos legales, tanto de autores e instituciones nacionales e internacionales, ha permitido a los autores del presente artículo arribar a las conclusiones parciales que aquí se presentan.

Fueron aplicados (por parte de los autores) cinco modelos diferentes de encuesta, con el formato de la Dirección General de Desarrollo Académico e Innovación Educativa, a través de la Subdirección de Innovación Educativa de la UACJ, intentando conocer desde elementos generales de las opiniones de la carrera hasta elementos específicos tales como qué asignaturas del currículum deberían ser optativas, cuáles obligatorias, qué softwares y conocimientos no dominan los egresados que son necesarios en su inserción laboral en la actualidad, etc. Asimismo, fueron evaluados criterios sobre la docencia, la estructura curricular, los perfiles terminales y los modos de titulación.

Otra herramienta aplicada en la investigación fue el análisis de los planes de estudio de once de las Licenciaturas en Diseño Industrial en México, a fin de asegurar que la

propuesta no careciera de actualidad y coherencia respecto al entorno nacional (Figura 1).

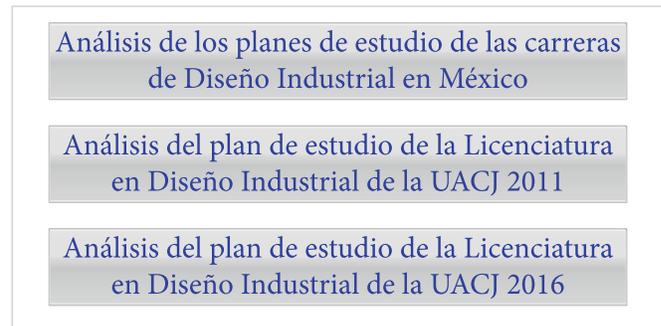


Figura 1. Planes de estudio evaluados.

Dentro de este tipo de observaciones, además, se realizó un análisis de los planes de estudio de la Licenciatura en Diseño Industrial de la UACJ de 2011 (propuesta que se aplica en la actualidad) y de 2016 (quedó en propuesta avanzada, aunque no se aplicó por temas organizativos). Este tipo de procesos permite construir el perfil considerado, identificar contenidos de aprendizaje, construir una estructura modular y diseñar estrategias de enseñanza-aprendizaje que, según Sosa <sup>[10]</sup>, son los cuatro momentos principales de los análisis previos a dictar las competencias requeridas en la formación de un profesional.

Después, este examen de los planes de estudio tomados en cuenta para la carrera permitió detectar áreas del conocimiento que posibilitan delinear competencias profesionales específicas, dentro de las que se inscriben unidades y elementos de competencia que compondrán la propuesta finalmente.

Por último, se detectaron 14 áreas del conocimiento: comunicación, sustentabilidad, diseño, tecnología, ergonomía, nociones de matemática, física, metodología de la investigación, método de diseño, antropología del diseño, ingeniería del producto, software, prácticas profesionales y gestión

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La propuesta se compone por competencias específicas que están constituidas por elementos de competencias y estos, a su vez, por unidades de competencias que pueden estar clasificados como *habilidades* (saber hacer) o *capacidades* (saber ser) y que, por su parte, se encuentran relacionados con un importante número de valo-

res que emergen de los análisis realizados previamente. Un primer acercamiento se compone de los elementos mostrados en la [Tabla 1](#).

TABLA 1  
RESUMEN DE COMPETENCIAS DECLARADAS Y SU CLASIFICACIÓN

ELEMENTO	NÚM.
Competencias profesionales específicas	14
Elementos de competencias	47
Competencias	78
Capacidades	41
Habilidades	37
Valores	27

Como competencias profesionales específicas quedaron las siguientes:

1. Dominar los principios de la comunicación.
2. Respetar los principios de la sustentabilidad desde el diseño.
3. Emplear los procesos y metodologías que permiten que se desarrolle el proceso de diseño.
4. Determinar los aspectos tecnológicos y productivos del objeto.
5. Estudiar y determinar *uso de un objeto*.
6. Poseer conocimientos sobre leyes y principios de la física.
7. Emplear metodologías y métodos para llevar a cabo el proceso de diseño.
8. Conocer la historia y la antropología del diseño industrial desde su contexto.
9. Incorporar nociones sobre ingeniería del producto.
10. Dominar softwares de representación y análisis digital de objetos en 2D y 3D.
11. Demostrar adecuación al contexto y la inserción laboral.
12. Demostrar capacidad de gestión de proyectos para crecer laboral y profesionalmente.
13. Demostrar sensibilidad y conciencia ante problemas sociales y humanos.
14. Abordar problemas profesionales de diversos niveles de complejidad.

De dicha propuesta, y con un nivel de profundización y análisis específico, se generó una serie de *habilidades* (saber hacer), *capacidades* (saber) y *valores* (saber ser) que pueden, en acuerdo y socialización dentro del co-

lectivo de profesores y tomadores de decisiones de la carrera, ser generalizados en la formación del diseñador industrial en Ciudad Juárez mirando al futuro. Tales resultados se presentan enseguida:

### Habilidades

- Identifica las nociones y reglas para la representación y el dibujo geométrico.
- Traduce coherentemente las necesidades del usuario a la forma del producto.
- Aplica los principios básicos de la forma para el diseño y la representación de productos industriales en 2D y 3D.
- Domina las reglas, escribe, lee y se expresa con claridad en idioma inglés.
- Expresa coherente y elocuentemente, los resultados y el proceso de diseño de manera verbal y escrita.
- Aplica de manera eficiente el diseño digital de presentación de resultados.
- Comunica verbal y gráficamente, los resultados y su proceso de trabajo.
- Aplica nociones de sustentabilidad al diseño de productos industriales.
- Extrapola principios de sustentabilidad a su actuar profesional y personal.
- Usa de manera coherente y efectiva los principios y recursos de diseño de estructuras formales.
- Describe las características y necesidades del usuario final del producto a diseñar.
- Demuestra habilidades para diseñar adecuaciones ergonómicas a productos industriales.
- Crea productos con alto grado de exigencia y calidad formal.
- Construye modelos funcionales de análisis y conceptualización.
- Domina métodos y técnicas empleados para enfrentar un encargo de diseño de experiencias.
- Domina las tecnologías y procesos relativos a la manufactura con vidrio y cerámicas.
- Domina las tecnologías y procesos relativos a la manufactura con madera.
- Domina las tecnologías y procesos relativos a la manufactura con metales.
- Domina las tecnologías y procesos relativos a la manufactura con textiles.
- Domina las tecnologías y procesos relativos a la manufactura con materiales plásticos.
- Domina los elementos relativos al diseño y producción de modelos y moldes.

- Detecta aspectos productivos que incidirán en el diseño del producto.
- Resuelve el producto de manera tal que puede ser manufacturado con la tecnología disponible.
- Identifica las nociones y reglas que rigen el comportamiento geométrico.
- Aplica las leyes de la física en la resolución de problemas y diseño de un producto.
- Aplica, para resolver el diseño de un producto, las metodologías y métodos más representativos a nivel nacional e internacional.
- Representa las características principales de las tendencias históricas y estilos formales del diseño en nuevos productos.
- Sostiene criterios sólidos y posturas teóricas para el análisis y comparación de objetos a partir de criterios respaldados por la historia del diseño.
- Reconoce los autores y obras principales, relacionados con el devenir histórico del diseño local y nacional.
- Resuelve óptimamente el diseño de dispositivos de uso industrial.
- Representa de forma precisa los resultados del diseño de dispositivos de uso industrial.
- Ejecuta exitosamente la representación digital de productos diseñados empleando softwares digitales.
- Se inserta naturalmente en el medio laboral.
- Enfrenta ejercicios que simulan situaciones y encargos de la vida laboral.
- Demuestra la capacidad de generar respuestas de diseño innovadoras.
- Se informa sobre los recursos disponibles para asistir a los sectores y/o grupos sociales en cada caso.
- Reconoce los retos del diseño sustentable a nivel local y global.
- Demuestra sensibilidad ante problemas ambientales.
- Reproduce comportamientos responsables en su proyección como profesional y ser humano.
- Domina los principios básicos del ordenamiento de estructuras formales para el diseño.
- Aplica los conocimientos y principios de la forma, al diseño de productos.
- Despliega amplia capacidad de conceptualización de productos industriales.
- Resuelve un encargo correspondiente el diseño de experiencias, aplicando métodos y técnicas correspondientes a este tipo de encargos.
- Analiza los elementos particulares a resolver en el uso de un producto industrial generado o rediseñado.
- Extrapola de manera adecuada los resultados de los análisis de uso al diseño de producto.
- Domina métodos y técnicas conceptuales para resolver el diseño de puestos y espacios de trabajo.
- Resuelve problemas y procesos, aplicando métodos estadísticos y matemáticos.
- Identifica y domina las leyes de la física que rigen el comportamiento de los objetos.
- Identifica los nombres y características de las metodologías y métodos más representativos que permiten organizar el proceso de diseño.
- Reconoce y cita los autores más importantes de dichas teorías.
- Aplica la secuencia y organización de las investigaciones en acuerdo con la metodología de la investigación científica.
- Reconoce tendencias históricas y estilos formales del diseño en la esfera objeto.
- Reconoce los rasgos y características de las tendencias de diseño a nivel nacional e internacional.
- Identifica los elementos históricamente ordenados que caracterizan el diseño mexicano.
- Conoce métodos y técnicas para la evaluación de productos de diseño.
- Evalúa, con exigencia y respaldo teórico, productos del diseño industrial.
- Domina principios, estándares y pruebas que permiten predecir y calcular la resistencia de los materiales.
- Domina pruebas que permiten predecir y calcular la resistencia y estructura de envases y embalajes.
- Conoce y emplea las herramientas de los principa-

### Capacidades

- Emplea las nociones y reglas para la representación y el dibujo geométrico.
- Demuestra habilidades manuales para la representación de productos industriales para el bocetaje conceptual.
- Reconoce los elementos y técnicas del dibujo técnico-mecánico para su empleo manual y digital con miras a la industria.
- Reconoce la terminología y los conceptos técnicos vinculados a la profesión del diseño industrial.
- Domina y controla los elementos de la comunicación extraverbal para comunicar los detalles y resultados de proyectos.

les softwares CAD para el diseño de producto (Solid Works, AutoCAD, Autodesk Inventor, Rhinoceros y otros).

- Desarrolla habilidades que le permiten emprender su propio negocio de diseño.
- Incorpora nociones de viabilidad de un proyecto de diseño.
- Conoce la legislación sobre propiedad intelectual de diseño.
- Reconoce lineamientos principales de la Carta Magna de México.
- Demuestra comportamientos de respeto y ética profesional.
- Domina elementos económicos que le permiten autogestionar su trabajo.
- Reconoce los problemas y carencias de la sociedad sensibles a ser resueltos mediante el diseño.
- Conceptualiza la solución de diseño, consciente del impacto social que podrá tener.
- Resuelve proyectos de diseño de producto.
- Resuelve proyectos de diseño de sistema de productos.
- Resuelve proyectos de diseño de servicios.
- Resuelve proyectos de diseño de experiencias.
- Resuelve proyectos de diseño de negocios.

### Valores

- Pensamiento flexible.
- Trabajo colaborativo.
- Liderazgo.
- Conciencia colectiva.
- Independencia.
- Actitud crítica y autocrítica.
- Capacidad de adaptación.
- Resiliencia.
- Ética profesional.
- Trabajo en equipo.
- Organización.
- Creatividad.
- Comunicación efectiva.
- Sinceridad.
- Empatía.
- Humildad.
- Solidaridad.
- Responsabilidad.
- Respeto.
- Capacidad argumentativa.
- Voluntad.

- Curiosidad.
- Motivación.
- Receptividad.
- Responsabilidad ecológica.
- Humanismo.
- Responsabilidad económica.

Cada uno de estos elementos de competencia proviene de un análisis pormenorizado de las fuentes documentales actualizadas y con alto nivel de investigación y resultados respecto a las competencias profesionales, las herramientas aplicadas y la discusión (durante dos semestres), del colectivo de profesores de la licenciatura, siendo revisado este por especialistas y expertos provenientes de otras especialidades.

## IV. CONCLUSIONES

A partir de este análisis y descomposición de las competencias profesionales a formar en el diseñador industrial para la carrera en cuestión en Ciudad Juárez, se llevó a estas conclusiones.

La formación profesional del diseñador industrial (independientemente del contexto de estudio), se encuentra condicionada por elementos contextuales, metodológicos, técnicos, tecnológicos, humanísticos y legales o institucionales.

Las competencias para formar al diseñador industrial, estando enfocadas a su actuar laboral, deben tener muy en cuenta las interrelaciones del profesional con su futuro colectivo, poniendo especial atención a la comunicación (verbal, extra-verbal y técnica, de procesos y resultados).

Las habilidades a desarrollar tienen que ver con la representación, la comunicación, la resolución de problemas vinculados al diseño industrial, la conceptualización, la aplicación de métodos aprendidos para desarrollar el proceso de diseño y con ejecutar los productos diseñados, técnicamente hablando.

Por su parte, las capacidades a formar en los profesionales en cuestión se relacionan con el análisis, el poder de síntesis, el emprendimiento, la creatividad, de reconocimiento de las necesidades que pueden ser resueltas por medio del diseño de objetos, la innovación y la gestión de su tiempo y recursos (técnicos y de tiempo).

Por otra parte, los valores se pueden agrupar en generales y de la profesión, siendo los primeros valores comunes para todo profesional egresado del nivel superior y los segundos son elementos específicos a formar para el ejercicio efectivo del diseño del producto.

Será implementado un manual de competencias profesionales que permita al docente y a los estudiantes visualizar, medir y trabajar en la formación de las diversas capacidades, habilidades, aptitudes y valores a ser formadas

## REFERENCIAS

- [1] J. M. González y R. Wagenaar, Coords. *Tuning Educational Structures in Europe*. España: Universidad de Deusto – Universidad de Groningen, 2003.
- [2] A. Díaz-Barriga, “El enfoque de competencias en la educación. ¿Una alternativa o un disfraz de cambio?”, *Perfiles educativos*, vol. XXVIII, no. 111, pp. 7-36, 2006.
- [3] C. Galdeano y A. Valiente, “Competencias profesionales”, *Educ. Química*, vol. 21, no. 1, 2010.
- [4] J. Moya, “Las competencias básicas en el diseño y el desarrollo del currículo”, *Revista Qurriculum*, no. 21, pp. 57-58, 2008.
- [5] H. Saavedra y O. Lazo, “Aplicaciones de la metodología TRIZ en el diseño ergonómico de estaciones de trabajo”, *Industrial Data*, vol. 16, no. 1, pp. 102-107, 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81629469012.pdf>
- [6] *Modelo Educativo UACJ. Versión intermedia*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, jun. 2020. [En línea]. Disponible: [http://www3.uacj.mx/sa/ie/Documents/Certificación\\_PIME-CIME/Docentes/Modelo\\_Educativo\\_UACJ.pdf](http://www3.uacj.mx/sa/ie/Documents/Certificación_PIME-CIME/Docentes/Modelo_Educativo_UACJ.pdf).
- [7] C. Tassara, “Agenda 2030 y retos de inclusión social en América Latina y el Caribe”, en *Documentos de Trabajo*, no. 29, 2020. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.33960/issn-e.1885-9119.dt29>
- [8] L. E. Macías, F. A. Bribiescas, H. S. Lee, J. Barojas y R. Ramírez, “Las competencias del diseñador industrial en la industria médica”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, año 11, no. 52, no. esp. 1, 2014. [En línea]. Disponible: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/870/823>
- [9] A. Morales-Holguín y E. O. Gonzalez-Bello, “Enseñanza y uso de métodos de diseño en México. Percepciones del profesorado”, *Form. Univ.*, vol. 13, no. 1, pp. 35-42, feb. 2020, doi: 10.4067/S0718-50062020000100035.
- [10] M. Sosa, “Competencias profesionales y formación universitaria”, presentada en la conferencia Educación Superior, jul. 2014, doi: 10.13140/2.1.4706.3683.

# Aprendizaje de Procedimientos Básicos de Enfermería a través de una Estrategia Interactiva Digital

## *Learning Basic Nursing Procedures through a Digital Interactive Strategy*

María Leticia Venegas-Cepeda<sup>1</sup>✉, Frida Hosana Aguilera-Díaz de León<sup>1</sup>, Darío Gaytán-Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí

### RESUMEN

En el presente artículo se presenta una evaluación del aprendizaje de la técnica del lavado quirúrgico antes y después de implementar un método de enseñanza con la utilización de un capítulo del libro interactivo digital *Procedimientos de Enfermería*. Se aplicó un método cuantitativo, preexperimental y longitudinal en enero 2019, en la Licenciatura de Enfermería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, donde participaron 29 alumnos de IV semestre. Se diseñó una lista de cotejo con el objetivo de evaluar el aprendizaje de la técnica del lavado quirúrgico. Los participantes realizaron el procedimiento con su conocimiento empírico, previo a la implementación de la estrategia interactiva educativa y posterior a ella. Para el análisis se utilizó la prueba t de Student para las muestras relacionadas con 95 % de confianza. Previo a la intervención, el grupo obtuvo una calificación mínima de 0 y una máxima de 4.2 y posteriormente aumentó con una calificación mínima de 3.6 y máxima de 10. El resultado demuestra un incremento en el conocimiento después de la intervención educativa. Los datos reflejan respuestas positivas a la incorporación de nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje.

**PALABRAS CLAVE:** tecnologías educativas; enseñanza; enfermería, aprendizaje.

### ABSTRACT

This article presents an evaluation of the learning of the surgical lavage technique before and after implementing a teaching method with the use of a chapter of the digital interactive book *Procedimientos de Enfermería*. A quantitative, pre-experimental and longitudinal method was applied in January 2019, in the Nursing Degree of the Autonomous University of San Luis Potosí, Mexico, where 29 fourth-semester students participated. A checklist was designed with the objective of evaluating the learning of the surgical washing technique. The participants carried out the procedure with their empirical knowledge, prior to the implementation of the educational interactive strategy and after it. For the analysis, the Student's t-test was used for related samples with 95% confidence. Before the intervention, the group obtained a minimum score of 0 and a maximum of 4.2 and subsequently increased with a minimum score of 3.6 and a maximum of 10. The result shows an increase in knowledge after the educational intervention. The data reflect positive responses to the incorporation of new teaching-learning strategies.

**KEYWORDS:** educational technologies; teaching; nursing; learning.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** María Leticia Venegas-Cepeda  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
**DIRECCIÓN:** Álvaro Obregón 64, Centro, C. P. 78300, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** leticia.venegas@uaslp.mx

**Fecha de recepción:** 11 de junio de 2021. **Fecha de aceptación:** 6 de abril de 2022. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

El gran paso para la evolución de la evaluación educativa fue dado por Thorndike a principios del siglo XX, cuando gana fuerza el movimiento por pruebas en el área de la educación en la medida en que la tecnología de la medición hacía rápidos avances [1]. Thorndike desarrolló todo un apartado tecnológico para medir las capacidades humanas, por lo que pasó la evaluación a tener significado de medida [2].

De acuerdo con los múltiples cambios que se han dado por el desarrollo tecnológico en las últimas décadas, el sistema educativo se ha visto en la necesidad de replantear sus programas, incorporando las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) [3], y la educación no ha sido ajena a los procesos de tecnología con influencias sociales, políticas y económicas. Por ello, la tecnología está modificando significativamente los paradigmas educativos convencionales y creando nuevos modelos de enseñanza y aprendizaje [4].

Promover innovaciones funcionales que generen mejoras en el contexto educativo supone comprometerse, de forma generalizada y a todos los niveles, con una práctica evaluadora que permita facilitar la toma de decisiones y generar un desarrollo progresivo de la calidad de los procesos y de los elementos que, directa o indirectamente, se implican en la consecución de las metas marcadas para la educación [5].

En otro aspecto, se conoce que en ocasiones la implementación de tecnologías educativas no siempre ha dado lugar a experiencias positivas de aprendizaje o resultados para los estudiantes. Aparte de las complicaciones de la tecnología, a menudo no se entiende completamente la dinámica generada por la introducción de la tecnología en el campo de la educación, por lo que la presente propuesta pretende evaluar el impacto académico y su usabilidad [6].

Cuando se implementan las TIC en la enseñanza educativa, estas han de ser consideradas en dos aspectos: en su conocimiento y en su uso [3]. El primer aspecto es consecuencia directa de los cambios de cultura de la sociedad actual, en donde no se puede entender el mundo de hoy sin un mínimo de cultura informática y el segundo radica en que es parte de un contexto desconocido, pero de una manera más técnica, ya que hace referencia a que se deben emplear las TIC para apren-

der y para enseñar, entendiéndose que la enseñanza y el aprendizaje de cualquier materia o habilidad se puede hacer de una manera más fácil mediante el empleo o incorporación de las TIC [4].

Finalmente, el propósito de este proyecto fue evaluar el impacto de una estrategia en la técnica sobre el lavado quirúrgico.

## II. METODOLOGÍA

Se realizó un estudio cuantitativo, preexperimental y longitudinal en enero de 2019 en la Facultad de Enfermería y Nutrición de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), México, en donde participaron 29 alumnos de IV semestre, mismos que aceptaron colaborar en esta investigación bajo previa firma de un consentimiento informado.

Los criterios de inclusión fueron: a) ser estudiante de la Licenciatura en Enfermería, b) estar cursando el IV semestre, c) tener nula experiencia en el procedimiento de lavado quirúrgico y d) ser alumno regular. El único criterio de exclusión fue tener conocimientos sobre la técnica de lavado quirúrgico de manos.

Se evaluó la aplicación de la técnica del lavado quirúrgico a través de una lista de cotejo ex profeso y basada en el procedimiento de lavado quirúrgico, según lo establece el Dr. Abel Archundia García [7].

La lista de cotejo fue diseñada por la autora principal del presente artículo y aplicada por una persona con conocimiento de la técnica fuera del grupo de investigación para evitar el sesgo en la percepción de la evaluación.

La lista de cotejo constó de 24 ítems divididos en 3 partes: *pre-implementación* (2 preguntas), se refiere a la primera fase en donde se recolectaba el material para llevar a cabo el procedimiento; *implementación* (17 preguntas), que es fase más importante en donde se realizó el procedimiento, y *post-implementación* (5 preguntas), en donde se concluye el procedimiento y ubican el material utilizado en su lugar correspondiente.

La lista de cotejo se aplicó antes, valorando el conocimiento sobre la técnica. El participante pudo utilizar el material necesario para realizar el procedimiento a través de su conocimiento empírico.

Un día después de ser evaluados, se aplicó la estrategia educativa a través de la demostración de la técnica del libro interactivo digital *Procedimientos de Enfermería* [8], utilizando el capítulo de lavado quirúrgico. En esta actividad educativa, con duración de una hora, se incorporaron vídeos, imágenes, imágenes *pop up*, animaciones, elementos interactivos enfocados a los distintos tipos de aprendizaje (visual, auditivo o kinestésico) y secciones de autoevaluación del tema.

Al término de la intervención, con el libro digital se aplicó de nuevo la evaluación con la lista de cotejo de manera individual. Este proceso tuvo una duración que osciló entre 15 y 20 minutos por participante para nuevamente realizar la técnica de lavado quirúrgico de manos.

Es importante mencionar que el proceso de evaluación tanto previo como posterior de la intervención se realizó sin responder a las dudas que le surgían sobre el procedimiento y se utilizó un ambiente similar al quirófano, con materiales específicos para el lavado quirúrgico.

Para el análisis se utilizó la prueba t de Student para muestras relacionadas con 95 % de confianza.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 29 participantes, 12 (41.4 %) tenía 19 años; 10 (34.5 %), 20 años; 2 (6.9 %), 18 años; 2 (6.9 %), 21 años; 2 (6.9 %), 22 años y 1 (3.4 %), 24 años de edad. En relación con el género de la población en estudio, el 93 % (27) es de género femenino y el 7 % (2) es género masculino en el grupo experimental

Previo a la intervención educativa, se aplicó una evaluación para identificar que se parte del desconocimiento del tema sobre el lavado quirúrgico.

Los resultados de esta evaluación permitieron identificar que el 100 % (29) de los estudiantes obtuvo una calificación reprobatoria menor a 5.9, con una mínima de 0 y una máxima de 4.2 de calificación (Tabla 1).

TABLA 1  
CALIFICACIÓN TOTAL PREVIA A LA INTERVENCIÓN

CALIFICACIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE (%)
< 5.9	29	100
6.0 - 8.0	0	
> 8.1	0	0
Total	29	100

Las calificaciones generales previas a la intervención en el grupo analizado son reprobatorias, por lo que se evidencia que se parte del desconocimiento de la población previo a la intervención.

Una vez realizada la intervención de enseñanza, los resultados obtenidos fueron los siguientes: el 45 % (13) obtuvo una calificación entre 8.1 y 10; el 38 % (11) alcanzó una calificación entre 6 y 8 y sólo el 17 % (5) logró una calificación menor a 5.9 (Tabla 2).

TABLA 2  
CALIFICACIÓN TOTAL POSTERIOR A LA INTERVENCIÓN

CALIFICACIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE (%)
< 5.9	5	17
6.0 - 8.0	11	38
> 8.1	13	45
Total	29	100

Se observa que previo a la intervención, el grupo obtuvo una calificación mínima de 0 y una máxima de 4.2. Posterior a la intervención educativa con un proceso de aprendizaje utilizando una estrategia interactiva digital, los resultados aumentaron, ya que los estudiantes lograron obtener una calificación máxima de 10 y una mínima de 3.6 (Tabla 3).

TABLA 3  
RELACIÓN DE LA CALIFICACIÓN GENERAL PREVIA Y POSTERIOR A LA INTERVENCIÓN

ESTADÍSTICO	PREVIO A LA INTERVENCIÓN	POSTERIOR A LA INTERVENCIÓN
Media	0.5	7.6
Mediana	0	8
Moda	0	8
Mínimo	0	3.6
Máximo	4.2	10

Lo anterior permite identificar que la actividad educativa por medio de una estrategia interactiva digital fue efectiva y se demuestra que la evaluación de la técnica fue mejor después de la intervención (Figura 1).

Los datos provenientes de este estudio reflejan una respuesta positiva a la innovación de estrategia de aprendizaje con medios digitales. Esto coincide con el resultado del artículo "La necesidad del cambio educativo para la sociedad del conocimiento" [9], donde, partiendo de un contexto desconocido, el aprendizaje puede ser de una manera más fácil mediante las TIC.

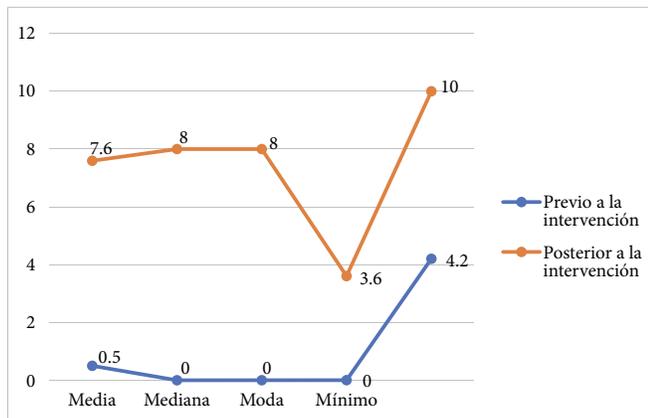


Figura 1. Relación de la calificación general previa y posterior a la intervención.

Relacionando estos resultados con el artículo “Evaluación, innovación y orientación educativa” [5], se puede referir que la implementación de tecnologías educativas no siempre ha dado lugar a experiencias positivas de aprendizaje. El presente trabajo es un indicio de que es posible ir integrando la tecnología a la educación para que los alumnos aprendan de una manera diferente a la tradicional y poder obtener mejores resultados, como en este caso. Es aquí donde la didáctica se aborda como la función del docente para estimular, promover, propiciar y proponer acciones que lleven al aprendizaje, utilizando recursos, medios y herramientas, ya que de esta forma el aprendizaje es concebido como un proceso de adquisición, reestructuración y cambio de las estructuras cognitivas en la que estos procesos cognitivos establecen una injerencia fundamental, la percepción, la atención y la memoria a partir de una interpretación dinámica y no estática, como se aprendía tradicionalmente [10].

La enseñanza virtual ha puesto un cambio radical en el planteamiento didáctico de la enseñanza y del aprendizaje. El papel de la universidad en la sociedad del conocimiento puede ser importante siempre y cuando esta pueda responder con flexibilidad a las demandas sociales [9] y al generar procesos de evaluación del aprendizaje se responde a indicadores de calidad de enseñanza. Además, con el uso del libro se permite que estudiante asuma su rol autónomo.

Con esta estrategia se pudo fortalecer el aprendizaje autónomo del estudiante, ya que no requirió la presencia física de un docente y se fortalece la autonomía o autodidacta. Sin embargo, no hay elementos para asegurar que con el método tradicional no se obtienen conoci-

mientos, lo que podría ser una limitante para futuras líneas de investigación.

## IV. CONCLUSIONES

Posterior a la intervención educativa con la utilización de un libro interactivo digital se reflejó un cambio positivo en el conocimiento sobre el tema de lavado quirúrgico de manos.

Estas habilidades están acordes con las tendencias que se buscan en un estudiante de educación superior. A partir de estos resultados, se pueden generar nuevas propuestas de enseñanza-aprendizaje que contribuyan a favorecer en los estudiantes competencias disciplinares con el uso de tecnologías de información y comunicación innovadoras.

Además, se pueden considerar procedimientos permanentes de capacitación de los docentes, ya que la actividad del profesor es clave para la integración, funcionalidad y aplicación de estas estrategias acordes a los objetivos cognitivos de los programas educativos.

Los resultados obtenidos permiten identificar que estas estrategias logran que el estudiante adquiera conocimientos disciplinares de una manera innovadora acorde a las necesidades actuales.

## REFERENCIAS

- [1] A. Ignacio Calderón y R. Maciel, “La evaluación educativa en el Brasil: de la transferencia cultural a la evaluación emancipadora”, *Educación*, vol. 22, no. 42, pp. 77-95, 2013.
- [2] J. Beltrán y L. Pérez, “Más de un siglo de psicología educativa. Valoración general y perspectivas de futuro”, *Papeles del Psicólogo*, vol. 32, no. 3, pp. 204-231, 2011.
- [3] D. Domínguez, “Conceptualización y prospectiva de los mundos virtuales como escenarios formativos”, *Revista española pedagógica*, vol. 69, no. 249, pp. 305-322, 2011.
- [4] L. Acosta-Castillo, “La relación entre los estilos de aprendizaje y el uso de las tecnologías de información y comunicación en educación de personas adultas”, *Revista Electrónica Educare*, vol. 20, no. 3, pp. 199-216, 2016, doi: 10.15359/ree.20-3.10.

- [5] M. Monescillo Palomo, “Evaluación, innovación y orientación educativa”, *Revista de Educación*, no. 2, pp. 11-42, 2000.
- [6] J. Sierra, I. Bueno y S. Monroy, “Análisis del uso de las tecnologías TIC por parte de los docentes de las Instituciones educativas de la ciudad de Riohacha”, *Omnia*, vol. 22, no. 2, pp. 50–64, 2016.
- [7] A. Archundia, *Educación quirúrgica para el estudiante de ciencias de la salud*. México: Méndez Editores, 2009.
- [8] E. A. Torres, M. C. Betancourt y M. L. Venegas, *Procedimientos de Enfermería*, 2018. [En línea]. Disponible: <https://kircof.com/books/11>. Consultado: en. 2, 2019.
- [9] J. Ginés, “La Necesidad del Cambio Educativo para la Sociedad del Conocimiento”, *Revista Iberoamericana de Educación*, vol. 35, pp. 13-37, 2004.
- [10] C. Tünnermann, “El constructivismo y el aprendizaje de los estudiantes”, *Universidades*, no. 48, pp. 21-32, 2011.

# Smart architecture for software-defined networking

## Arquitectura inteligente para redes definidas por software

Jose Mejia<sup>1</sup>, Oliverio Cruz-Mejia<sup>2</sup>, José Alfredo Acosta-Favela<sup>1</sup>, Alejandra Mendoza-Carreón<sup>1</sup>, René Noriega Armendáriz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)

<sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

### ABSTRACT

Software-defined networks (SDN) seek to solve the problems in current network schemes by simplifying their management through their reprogrammability and accessibility to the overall network infrastructure. One aspect to improve in SDN-based schemes is the precise classification of your traffic load, this can improve various aspects such as quality of service, dynamic access control, prioritized random access, among others. This research aims to propose a conceptual architecture of SDN and evaluate different machine learning methods for traffic classification. To this end, SDN architectures are analyzed and different modules are proposed to strengthen their management with the help of low computational cost classifiers. The architecture proposes the following main modules: Capture network traces module, Learning Engine module, and ML-model and Flow classifier. To determine the model to be used in the Learning Engine and Flow classifier modules, different classifiers were evaluated using a database of network traffic, as a result, it was determined that the gradient boosting algorithm is the most suitable to be integrated with the proposed SDN architecture.

**KEYWORDS:** software-defined networks; machine learning; gradient boosting.

### RESUMEN

Las redes definidas por software (SDN) buscan resolver los problemas de los esquemas de red actuales al simplificar su gestión a través de su programabilidad y accesibilidad global a la infraestructura de red. Un aspecto para mejorar en esquemas basados en SDN es la clasificación precisa de su carga de tráfico, esto puede mejorar diversos aspectos como calidad de servicio, control de acceso dinámico, acceso aleatorio priorizado, entre otros. Esta investigación tiene como objetivo proponer una arquitectura conceptual de SDN y evaluar diferentes métodos de aprendizaje automático para la clasificación del tráfico. Con este fin, se analizan las arquitecturas de SDN y se proponen diferentes módulos para robustecer su gestión con ayuda de clasificadores de bajo costo computacional. La arquitectura propone los módulos principales siguientes: módulo de captura de datos de red, módulo de aprendizaje con modelo de Machine Learning y módulo clasificador de flujo. Para determinar el modelo de ML a utilizar en los módulos de aprendizaje y clasificador de flujo, se evaluaron diferentes clasificadores mediante una base de datos, como resultado se determinó que el algoritmo de *gradient boosting* o potenciación del gradiente es el más adecuado para integrarse a la arquitectura SDN propuesta.

**PALABRAS CLAVE:** redes definidas por software; aprendizaje automático; *gradient boosting*.

**Corresponding author:** Jose Mejia  
**Institution:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología  
**Address:** Av. Del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C. P. 32310  
**E-mail:** jose.mejia@uacj.mx

**Manuscript received:** December 8, 2021; **accepted:** April 1, 2022. **Date of publication:** April 28, 2022.



## I. INTRODUCTION

Software-Defined Networks (SDN) is an approach to address the complexity and challenges that modern computer networks face to manage and scale today's requirements. SDN attempts to solve these issues by providing a control architecture that is centralized and highly scalable. This helps to manage large-scale networks and data centers [1]. SDNs have increased recently because of their flexible management and monitoring capabilities, which has been possible because of their centralized architecture, which can manage a set of switches by modifying flow table entries on demand for better adaptation [2]. The control plane in SDN uses special protocols, such as OpenFlow, which enables the network managers to monitor statistics, decide strategies, and interact with the switches, thus enabling an improvement of the network performance [3].

Because of the importance of network management for an optimum operation, SDN has been applied also to ad hoc networks and in particular to networks consisting of devices known as the Internet of Things (IoT) [4], [5]. These ad hoc networks have recently experienced rapid growth because of their implementation in smart cities, industry 4.0, and home automation [6], [7], [8]. These networks also have increased their services and related applications provided through the network, thus recently research has been carried out on the integration of SDN and IoT [9].

Even though the advantages offered by SDN, network applications still have challenges related to Quality-of-Service (QoS) and customized service level agreements (SLAs) [10], [11]. Allocation of resources to applications to guarantee a certain level of performance, availability, and reliability is one of the main concerns in SDN schemes as well as optimizing the deployment of resources using different mechanisms to meet the QoS and SLA [11]. One way to approach this problem is through the management of network packets or flows through the differentiation of data according to the particular applications or services provided by the ad hoc network. Thus, network traffic classification is an important component of modern SDN [11].

The problems outlined above make it a necessity to develop approaches to automatically classify network data to optimize the deploying of resources using different mechanisms to meet the QoS and SLA. The use of ma-

chine learning for classification is key to enabling the improvement of the SDN in the network performance.

In this paper, the performance of several machine learning classification algorithms for use in SDN is reviewed. Also, a conceptual SDN architecture that implements a machine learning classification scheme for network classification is proposed.

In the following paragraphs, we review related work to our investigation. Thus, some relevant algorithms for traffic classification in the context of SDN were reviewed. In [10], it is proposed the integration of SDN and machine learning to classify data traffic based on the applications in a software-defined network platform and also the authors evaluated three different learning models: Support Vector Machines, nearest centroid, and Naive Bayes, methods that were chosen for their simplicity. Network traffic traces and flows features of the captured data, and these attributes are sent to a classifier for prediction were used. Higher accuracy for the Naive Bayes classifier of 96.79% was found.

In [3], the authors propose an SDN that uses in its control plane section a traffic classifier that detects the traffic of the data plane and helps the QoS module to modify flow rules for the switches. This classifier is based on deep learning. The proposed classifier models use long short-time memory layers (LSTM) and the other convolutional layers and LSTM. To find and optimize the neural network hyper-parameters, they used a cross-validated grid search and they found that the LSTM model can classify the network traffic better than the CNN with LSTM because the long-term dependency between packets is handled properly by the LSTM alone.

Additionally, a series of traffic classifiers, in this case, to detect and predict SYN flood, a case of DoS attack, were proposed in [12]. They evaluated machine-learning algorithms based on Decision Trees, Support Vector Machines, and Naive Bayes and perform an analysis of their performance. They also implemented a real-time system implementing a controller that uses the models to classify packets and report that Decision Trees perform best on the analysis of the data, while NB has better performance in a real-time system.

A method was proposed in [11] for improving traffic flows by using machine learning classification. They use 44 attributes of the packet flow as features, which they

reduced further by using Principal Component Analysis. Three different classifier algorithms were evaluated: Nearest Centroid, Naive Bayes, and Vector Machines. It was found that all the classifiers have a good performance, being better by a minimum margin than the Nearest Centroid method.

## II. METHODOLOGY

In this section, it is described the methodology used, first a revision of the theory and background is presented.

### A. THEORY AND BACKGROUND

In this section, a general review of the architecture of SDN is presented. Also, the considered ML algorithms are described.

#### *SDN architecture*

As the modern network increases its complexity, its management also presents challenges and complications. In recent times, this has been intensified because of the use of manual operations and low-level programming of vendor-specific devices. SDN tries to alleviate the network management and configuration by proposing a centralized approach to network management and more standard programming of the underlying network hardware [2], [13].

The SDN basic architecture consists of an infrastructure or data plane, a control plane, and an application plane, as shown in Figure 1.

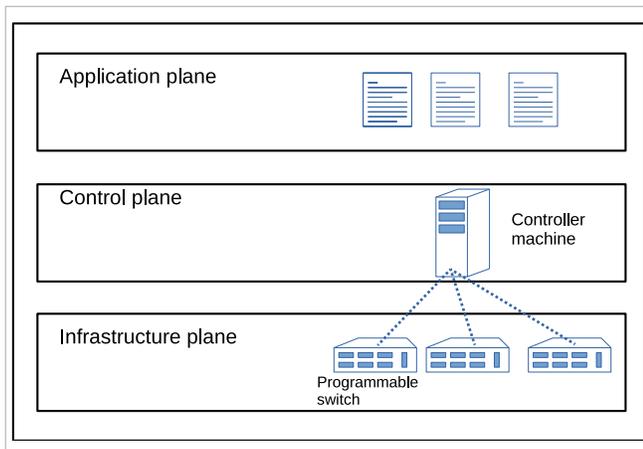


Figure 1. SDN basic architecture.

The Infrastructure or Data plane consists of switching and routing devices. These devices could be programmed employing a forwarding table or flow rules and in the context of SDN these devices act as simple forwarding devices that receive routing paths directly from the controller [14].

The Control plane maintains a global view of the network and controls the infrastructure devices by policy routing decisions. The controller provides the applications in the application plane and a programming interface that hides the specifics of the infrastructure devices [13].

The Application plane consists of SDN applications that help to manage the network devices. Generally, the applications in this plane are driven by events coming from the controller to which the application must react appropriately.

This work explores means to improve the SDN performance using machine learning for classification and the proposal of modules in the control and application planes.

#### *Machine learning*

Next, several machine learning algorithms that could be used for network traffic classification are described. They were chosen because of their low computational cost and ease to train, as compared, for example, with deep learning classifiers.

**Naive Bayes:** This classifier is a probabilistic model, which predicts the class with the highest posterior probability. Naive Bayes assumes independence between instances. However, this assumption is generally not true for most data sets, but still, the classifier could achieve a decent classification precision. Because of its lower computational cost, the Naive Bayes classifier is considered first when the application requires real-time processing of data. Also, another advantage of this classifier is that it only requires a small amount of data for training [15].

**Support Vector Machines:** A support vector machine is a classification algorithm that finds the best possible separation between classes. The support vectors define the maximum margin of separation of the hyperplane that separates the classes. When the classes consid-

ered are not linearly separable, kernel functions could be used with the algorithm to solve the more complex problem. The computational cost of this algorithm is relatively lower.

**K-Nearest Neighbors:** In this classification algorithm, the complete training data is stored because the model does not learn a model but uses explicitly the training samples and then is later used for the prediction. The new instances are classified by choosing the majority class among the K closest examples of the stored data [16].

**Decision Tree:** These classifiers are composed of nodes, each dividing the space of features of the training data by grouping observations with similar values [17]. To carry out this division, a series of rules called decisions are applied, trying that each sub-region contains the largest possible samples from one of the classes of the data.

**Random Forest:** In this classification method, bagging is used to combine several decision trees. Hence, the different trees operate on different segments of the data and each tree is trained with different data samples of the training set. Finally, by combining the results of the different trees, errors of a particular tree could be compensated by other trees, increasing the accuracy and generalization of the method [18].

**Gradient Boosting:** Boosting in the context of machine learning refers to creating a strong classifier out of many weak ones. Thus, Gradient Boosting consists of several classifiers, for these a suitable loss function is used. The error calculated from the loss function using a classifier is the “gradient” of the gradient boosting, which indicates how to build the next classifier [19]. For this work, it is used using an ensemble of decision trees to predict a target label.

In the results section, some of these algorithms are evaluated using a database of network packets.

### B. SDN ARCHITECTURE WITH THE CLASSIFICATION OF NETWORK DATA

This section described in detail the proposed architecture. It is outlined the design and described the specific steps for its development, details of the modified planes are also provided.

### Architecture design

The main goal of the architecture is to increase the throughput of the network in the face of changes in traffic that occurs in the network’s normal operation, and the proposed scheme focused on traffic-based classification in the network. This is accomplished by extending the functionality of the controller.

The proposed architecture is implemented as an application module, consisting of a module for the training model sitting on top of the controller and two modules on the control plane: a capture module and a flow classifier. The architecture is shown in Figure 2 and described next.

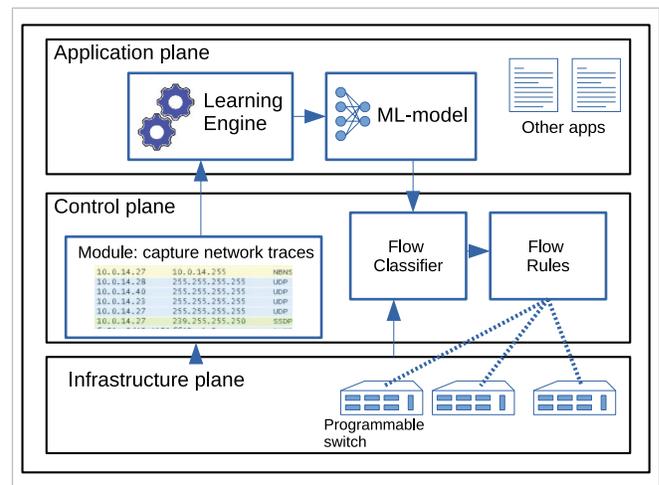


Figure 2. The proposed architecture consists of four modules: Capture, Learning Engine, Machine Learning (ML) model, and Flow classifier.

#### Capture network traces module

This module is connected to the underlying SDN infrastructure to acquire data from the network. Then new data is sent to the learned Engine to adapt the model to the new environment or infrastructure changes.

#### Learning Engine module and ML-model

The module is connected to the capture module, it processes the data from the capture module and uses machine learning algorithms to process the data and train a model. The specific implementation depends on the machine learning model, for example, for GB the module minimizes its loss function with the available data to adapt the model to the incoming packets. This module

is executed only when the model needs to adapt to new data or changing conditions.

#### Flow classifier

The objective of this module is to classify the flow of information. It uses a trained ML model obtained from the Learning Engine. Once the flow has been classified, it is expected that traffic performance increases throughout the network.

#### Classification of network data

For data testing of the Learning Engine module and ML model, a machine learning model must be selected. The selected model must be easy to implement and with a computational complexity that permits real-time processing of the data. Thus, for the selection of the classification model, the following models are tested: Naive Bayes, Support Vector Machines, k-nearest neighbors, Random Forest, Decision Tree, and Gradient Boosting.

### C. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup is aimed at assessing machine learning algorithms for integration with the *flow classification module* of the proposed architecture. To this end, the performance of several classification methods was evaluated. From the available evaluation approaches that can be considered as metrics of performance, the following were selected: precision, recall, and F1 score.

The experiments involved the use of a data set to test the proposed scheme. Thus, we used traffic flow records from a database [20]. The data was acquired from a network of the Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

Data packet captures were acquired at different hours of the day between April and June 2019. The database consists of a comma-separated values file with each record containing 50 features, more details of the database are in [20].

For this study, the packet types specified in Table 1, extracted from the database, were used and the number of records to 1495.

Even though the classes are unbalanced, no actions were taken to correct it to observe the adaptability of the classification algorithms. Note that this database was al-

ready used to evaluate ML algorithms in [20], however, in this work the target classes are different from those used in that work.

TABLE 1  
CLASSES OF THE DATABASE

TYPE	#CASES
'Network'	270
'Web'	465
'SoftwareUpdate'	22
'Unspecified'	355
'RPC'	28
'System'	41
'Cloud'	40
'Email'	274
Total	1495

The ML models to evaluate were those presented in Section A. As stated before, those were chosen because of their low computational cost and ease of training. The machine learning models were trained on subsets of the database and evaluated on the complementary subset of the data. To this end, K-fold cross-validation was used, this method also allows us to detect possible over-fitting. This technique is frequently used in machine learning to compare, validate, and select models, because it provides a good estimate of the generalization achieved by the algorithms, and results in performance estimates generally have a lower bias than other methods. For this experiment, the data set was split into ten sections or folds, that is, a value for K equal to 10 was used, thus becoming 10-fold cross-validation. During the test, each fold was used as a testing set at some point in the experiment.

## III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Here we present the results obtained from evaluating the ML models on the dataset. The accuracy of each method is shown in Figure 3 using a box plot that condenses the obtained results.

From Figure 3, Random Forest (RF) obtained the best accuracy overall, followed by Gradient Boosting (GB) and Decision Trees (DT), while Gaussian Naive Bayes (GNB) has the worst accuracy. This last classifier GNB is one with the lowest computational costs, so a future work could be to adapt the distribution of the classifier to that of the data from network packets.

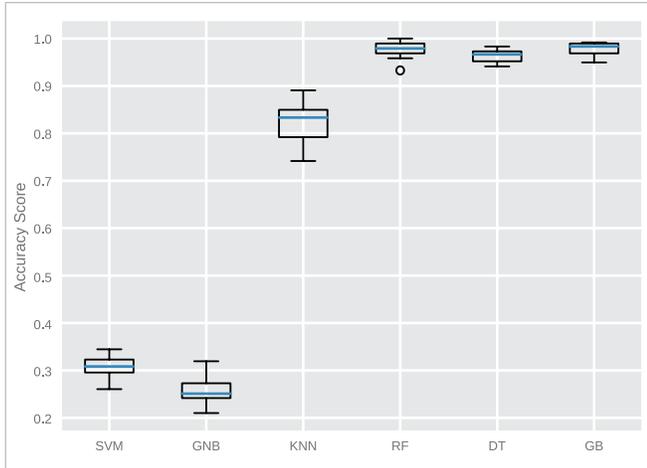


Figure 3. Box plot of the accuracy achieved by each method. The models presented in the horizontal axis are: Support Vector Machine (SMV), Gaussian Naive Bayes (GNV), K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF), Decision Trees (DT), and Gradient Boosting (GB).

Figures 4 to 7, present class prediction error reports from the best four classifiers: K-Nearest Neighbors (KNN), Random Forest (RF), Decision Trees (DT), and Gradient Boosting (GB). For this report, the full database was used, 80% for training and 20% for validation.



Figure 4. Class Prediction error for K-Neighbors.

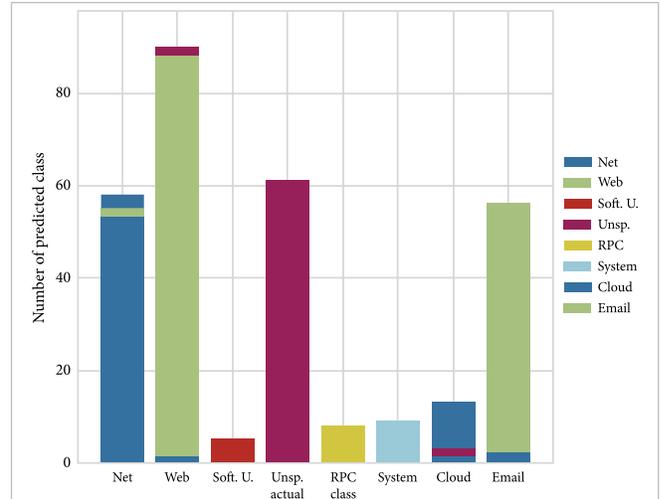


Figure 5. Class Prediction error for Random Forest.

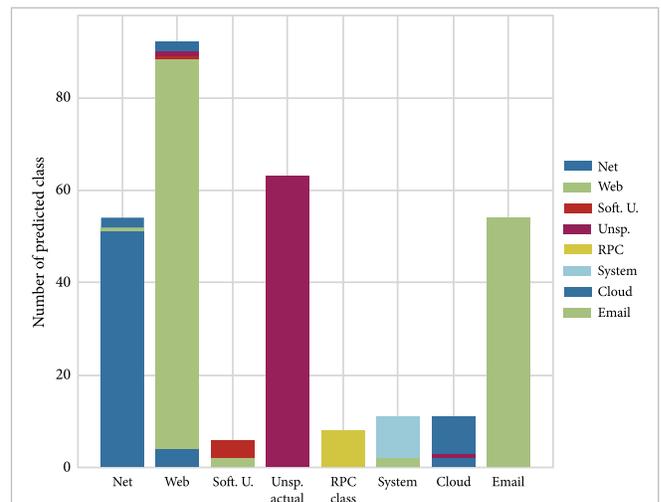


Figure 6. Class Prediction error for Decision Trees.

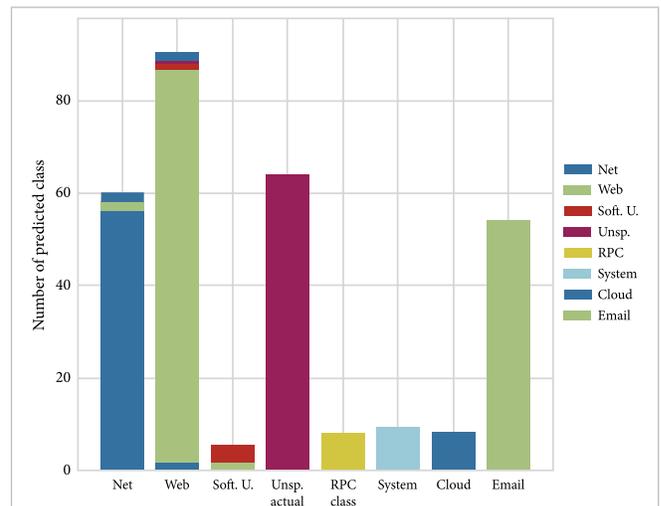


Figure 7. Class Prediction error for Gradient Boosting.

Also, Figures 8 to 11, present the summary of the precision, recall, and f1 scores.

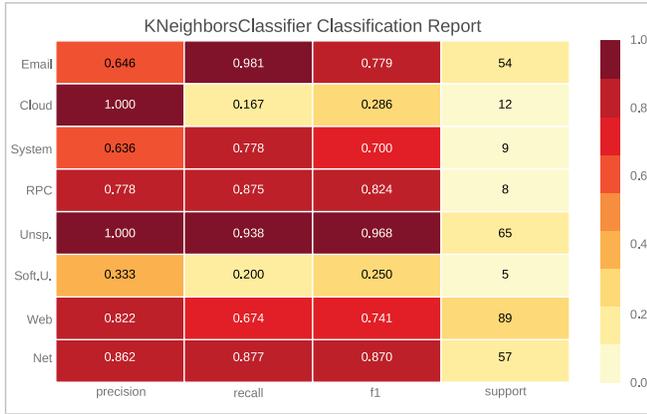


Figure 8. Classification report for K-Neighbors.



Figure 9. Classification report for Random Forest.



Figure 10. Classification report for Decision Trees.

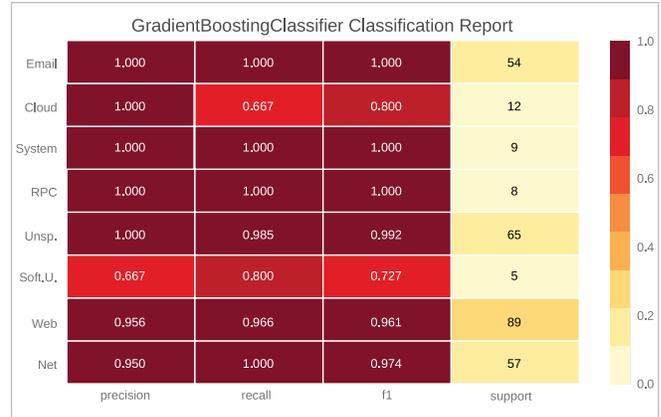


Figure 11. Classification report for Gradient Boosting.

Gradient Boosting Decision Trees outperforms the rest of the classifiers in most categories. However, with a low margin concerning gradient boosting, for class ‘web’ the best precision is achieved by the random forest classifier and for class ‘net’ decision tree is best. It is remarkable how gradient boosting Decision Trees achieve a good classification even in categories with low support. Finally, Table 2 shows a global summary of the classification results.

Finally, in this work, it was decided to use classifiers that are faster to train and easier to integrate with the classifier module, unlike other works, such as [3], where more complex architectures such as LSTM are proposed. It was also decided not to calculate features through complex transformations such as the principal component analysis, which is proposed in [11]. Furthermore, unlike [10], the proposed architecture integrates with the relevant layers of an SDN infrastructure rather than as a separate module.

#### IV. CONCLUSIONS

In this work, a new SND architecture that includes a classifier module is presented. The proposed architecture consists of a modification in the application and control planes of the SND architecture, to accommodate a classification stage.

TABLE 2  
GLOBAL SUMMARY

TYPE	PRECISION				RECALL				F1			
	K-N	RF	DT	GB	K-N	RF	DT	GB	K-N	RF	DT	GB
Email	0.871	0.964	1	1	1	1	1	1	0.931	0.982	1	1
Cloud	1	0.833	0.727	1	0.333	<b>0.833</b>	0.667	0.667	0.5	<b>0.833</b>	0.696	0.8
System	0.875	1	0.818	1	0.778	1	1	1	0.824	1	0.9	1
RPC	0.8	1	1	1	1	1	1	1	0.889	1	1	1
Unsp.	1	1	1	1	0.938	0.938	0.954	<b>0.985</b>	0.968	0.968	0.976	<b>0.992</b>
Soft. U.	0.5	0.833	0.714	1	0.4	1	1	0.8	0.444	<b>0.909</b>	0.833	0.889
Web	0.901	<b>0.967</b>	0.913	0.946	0.921	<b>0.978</b>	0.944	<b>0.978</b>	0.911	<b>0.972</b>	0.928	0.961
Net	0.898	0.93	<b>0.944</b>	0.933	0.93	0.93	0.895	<b>0.982</b>	0.914	0.93	0.919	<b>0.957</b>

Several classification algorithms in a database of network packets were tested. Algorithms were selected by their relatively low computational cost as compared with other algorithms such as those based on deep learning. Random Forest (RF), Decision Trees (DT), and Gradient Boosting (GB) were found to be suitable algorithms, each achieving more than 0.9 of accuracy. However, overall results show gradient boosting algorithm is the most adequate for the classification module in the SDN architecture proposed.

### REFERENCES

- [1] N. Noorani y S. A. H. Seno, "SDN- and fog computing-based switchable routing using path stability estimation for vehicular ad hoc networks", *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 13, pp. 948-964, may. 2020, doi: [10.1007/s12083-019-00859-4](https://doi.org/10.1007/s12083-019-00859-4).
- [2] A. R. Mohammed, S. A. Mohammed y S. Shirmohammadi, "Machine Learning and Deep Learning Based Traffic Classification and Prediction in Software Defined Networking", *2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, 2019, pp. 1-6, doi: [10.1109/IWMN.2019.8805044](https://doi.org/10.1109/IWMN.2019.8805044).
- [3] J. Mejia, L. Avelar-Sosa, B. Mederos, E. Santiago y J. D. Díaz, "Prediction of time series using an analysis filter bank of LSTM units", *Comput Ind Eng*, vol. 157, 2021, doi: [10.1016/j.cie.2021.107371](https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107371).
- [4] K. Sood, S. Yu y Y. Xiang, "Software-Defined Wireless Networking Opportunities and Challenges for Internet-of-Things: A Review", en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 4, pp. 453-463, ag. 2016, doi: [10.1109/JIOT.2015.2480421](https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2480421).
- [5] S. H. Rastegar, A. Abbasfar y V. Shah-Mansouri, "Rule Caching in SDN-Enabled Base Stations Supporting Massive IoT Devices With Bursty Traffic", en *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 8917-8931, sept. 2020, doi: [10.1109/JIOT.2020.3000393](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3000393).
- [6] B. K. Mukherjee, S. I. Pappu, M. J. Islam y U. K. Acharjee, "An SDN based distributed IoT network with NFV implementation for smart cities", en *Cyber Security and Computer Science*, T. Bhuiyan, M. M. Rahman y M. A. Eli, Eds., Springer, Cham, 2020, doi: [10.1007/978-3-030-52856-0\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-52856-0_43).
- [7] Y. -W. Ma, Y. -C. Chen y J. -L. Chen, "SDN-enabled network virtualization for industry 4.0 based on IoTs and cloud computing", *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2017, pp. 199-202, doi: [10.23919/ICACT.2017.7890083](https://doi.org/10.23919/ICACT.2017.7890083).
- [8] L. Silva, P. Pedreiras, P. Fonseca y L. Almeida, "On the adequacy of SDN and TSN for Industry 4.0", *2019 IEEE 22nd International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2019, pp. 43-51, doi: [10.1109/ISORC.2019.00017](https://doi.org/10.1109/ISORC.2019.00017).
- [9] A. Yazdinejad, R. M. Parizi, A. Dehghantanha, Q. Zhang y K. -K. R. Choo, "An Energy-Efficient SDN Controller Architecture for IoT Networks With Blockchain-Based Security", en *IEEE Transactions on Services Computing*, vol. 13, no. 4, pp. 625-638, 1 jul.-ag. 2020, doi: [10.1109/TSC.2020.2966970](https://doi.org/10.1109/TSC.2020.2966970).

- [10] M. M. Raikar, S. M. Meena, M. M. Mulla, N. S. Shetti y M. Karanandi, "Data Traffic Classification in Software Defined Networks (SDN) using supervised-learning", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 171, pp. 2750-2759, 2020, doi: [10.1016/j.procs.2020.04.299](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.299).
- [11] M. Amiri, H. Al Osman y S. Shirmohammadi, "Game-Aware and SDN-Assisted Bandwidth Allocation for Data Center Networks", *2018 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR)*, 2018, pp. 86-91, doi: [10.1109/MIPR.2018.00023](https://doi.org/10.1109/MIPR.2018.00023).
- [12] S. Gangadhar y J. P. G. Sterbenz, "Machine learning aided traffic tolerance to improve resilience for software defined networks", *2017 9th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, 2017, pp. 1-7, doi: [10.1109/RNDM.2017.8093035](https://doi.org/10.1109/RNDM.2017.8093035).
- [13] P. Goransson, C. Black y T. Culver, *Software defined networks: a comprehensive approach*, Morgan Kaufmann, 2016.
- [14] N. McKeown et al., "Openflow: enabling innovation in campus networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69-74, 2008, doi: [10.1145/1355734.1355746](https://doi.org/10.1145/1355734.1355746).
- [15] R. Mosquera, O. D. Castrillón y L. Parra, "Máquinas de Soporte Vectorial, Clasificador Naïve Bayes y Algoritmos Genéticos para la Predicción de Riesgos Psicosociales en Docentes de Colegios Públicos Colombianos", *Inf. Tecnol.*, vol. 29, no. 6, pp. 153-162, 2018, doi: [10.4067/S0718-07642018000600153](https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000600153).
- [16] P. Horton y K. Nakai, "Better Prediction of Protein Cellular Localization Sites with the it k Nearest Neighbors Classifier", en *Proc Int Conf Intell Syst Mol Biol*, vol. 5, pp. 147-152, jun. 1997.
- [17] S. R. Safavian y D. Landgrebe, "A survey of decision tree classifier methodology", en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 21, no. 3, pp. 660-674, may.-jun. 1991, doi: [10.1109/21.97458](https://doi.org/10.1109/21.97458).
- [18] V. F. Rodriguez-Galiano, B. Ghimire, J. Rogan, M. Chica-Olmo y J. P. Rigol-Sanchez, "An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification", *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 67, pp. 93-104, 2012, doi: [10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002).
- [19] G. Biau, B. Cadre y L. Rouvière, "Accelerated gradient boosting", *Mach Learn*, vol. 108, no. 6, pp. 971-992, 2019, doi: [10.1007/s10994-019-05787-1](https://doi.org/10.1007/s10994-019-05787-1).
- [20] J. S. Rojas, A. Pekar, Á. Rendón y J. C. Corrales, "Smart User Consumption Profiling: Incremental Learning-Based OTT Service Degradation", en *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207426-207442, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3037971](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3037971).

# Uso de KDSM para la Gestión de Conocimiento en el Ámbito de la TEC

## *Using KDSM to Knowledge Management in ECT Domain*

Angélica Pérez-Campos<sup>1</sup>✉, Alicia Margarita Jiménez-Galina<sup>1</sup>, Jorge Rodas-Osollo<sup>1</sup>, Karla Olmos-Sánchez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

### RESUMEN

Este artículo tiene como objetivo comunicar los resultados del uso de la metodología KDSM (Knowledge Management in Serial Measurements) para gestionar conocimiento proveniente de un estudio que emplea la Terapia Electro-Convulsiva (TEC) en 183 pacientes con diversos padecimientos psiquiátricos severos. La organización de la información de la TEC es singular, pues caracteriza cuantitativa y cualitativamente tanto al paciente como a la TEC misma, y además abarca medidas seriadas muy cortas y repetidas donde se ejerce un factor de bloque por parte del paciente y que representa el monitoreo de la evolución del mismo tras cada aplicación de un electrochoque (ES). La implementación de la metodología KDSM permite al especialista obtener conocimiento valioso que posibilita visualizar e interpretar la respuesta de los pacientes y la misma TEC y, a la postre, optimizar cada sesión de ES y consecuentemente minimizar los efectos secundarios, como lo es la pérdida de memoria.

**PALABRAS CLAVE:** KDSM; gestión de conocimiento; terapia electroconvulsiva.

### ABSTRACT

This article communicates the use of the Knowledge Management in Serial Measurements (KDSM) methodology to manage knowledge from a study of Electro-Convulsive Therapy (ECT) applied to 183 patients with various severe psychiatric conditions. The structure of the ECT information is unique, especially because patients are quantitatively and qualitatively characterized also the ECT itself and, in addition, this domain contains very short and repeated serial measures where a block factor is presented and exerted by the patient and represents the monitoring of the patient's evolution after each application of an electroshock (ES). The implementation of the KDSM methodology allows the specialist to obtain valuable knowledge that allows him to visualize and interpret the response of the patients and the ECT itself, and to optimize each ES session and consequently minimize side effects such as memory loss.

**KEYWORDS:** KDSM; knowledge management; electroconvulsive therapy.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Angélica Pérez-Campos

**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT)

**DIRECCIÓN:** Av. del Charro 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México

**CORREO ELECTRÓNICO:** al198950@alumnos.uacj.mx

**Fecha de recepción:** 22 de octubre de 2021. **Fecha de aceptación:** 4 de marzo de 2022. **Fecha de publicación:** 19 de marzo de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día se puede encontrar una gran cantidad de información por doquier y, que, en el mejor de los casos, suele estar bien definida y con una estructura formal, lo que permite tener acceso al conocimiento de una manera sencilla. Sin embargo, existen dominios tales como la medicina, la arquitectura, etc., que contienen información ni estructurada ni definida, por lo que, con frecuencia, la búsqueda es una tarea muy compleja.

En [1] se menciona que los Dominios de Estructura Informal (DEI) cuentan con las siguientes características: información y datos heterogéneos, conocimiento incompleto y diversos grados de especificidad debido al conocimiento tácito, aparte de no poseer ninguna estructura formal. En consecuencia, lograr una elicitación del conocimiento apropiada en un DEI es una tarea complicada debido a que no posibilita un proceso estándar de gestión del conocimiento. En suma, las características de los DEI [2] son:

- Conocimiento parcial y no homogéneo.
- Datos e información heterogéneos.
- Se tiene conocimiento adicional con respecto al dominio.

De esta manera, la Terapia Electro-Convulsiva (TEC) cumple con estas características y es considerada un dominio DEI debido especialmente a la cantidad de conocimiento tácito que posee. Tomando en cuenta que la TEC se recomienda en pacientes con trastorno depresivo mayor y algunas esquizofrenias, este artículo describe un caso de estudio de los efectos de la TEC aplicada en pacientes con estos padecimientos. Se analizan y estructuran los datos para brindar conocimiento y apoyar en la toma de decisiones a los especialistas del dominio.

En la actualidad, existen estudios que han mostrado buenos resultados al aplicar técnicas de inteligencia artificial (IA), tales como el aprendizaje automático (AA) en diversas disciplinas [3], [4], [5], [6], entre ellas ciencias sociales, finanzas, industria, domótica, conducción autónoma de vehículos, mercadotecnia, distribución de recursos y reconocimiento facial [6]. Otras investigaciones aplican el AA y muestran buenos resultados en el campo de la medicina, tales como medicina personalizada [3], investigaciones clínicas [4], mejora de procesos, prevención de enfermedades, mejora de diagnósticos

y seguimiento de los tratamientos [6], por mencionar algunos. Además, se han realizado estudios que implementan la metodología KDSM (del inglés Knowledge Discovery in Serial Measurements) para la gestión del conocimiento en dominios que presentan medidas seriadas muy cortas y repetidas con factor de bloque, debido a que es una metodología ad hoc mediante técnicas de la estadística y el aprendizaje automático [7]. En particular, este artículo comunica la implementación de esta metodología debido a que el dominio del estudio cuenta con todas las características mencionadas previamente.

La estructura de este artículo se muestra como sigue: en la sección II se presenta el dominio de aplicación; en la sección III, una descripción del caso de estudio; en la sección IV se describe el análisis de la TEC mediante la metodología KDSM; en la sección V se comentan algunos resultados y, para terminar, en la sección VI se describen las conclusiones

## II. DOMINIO DE APLICACIÓN

Según Kellner *et al.* [8], la TEC es una terapia importante dentro de la rama de la medicina psiquiátrica para los pacientes que sufren de trastornos psicóticos y de estados de ánimos muy graves. Se trata de aplicar un conjunto de electrochoques (ES, del inglés *electroshock*), es decir, colocar una corriente eléctrica que lleve a cabo convulsiones en el cerebro con la finalidad de ayudar a mejorar la situación psiquiátrica del paciente.

De acuerdo con Landry *et al.* [9], la TEC sigue siendo una terapia más efectiva para diferentes tipos de trastornos psiquiátricos, la cual se acostumbra como último recurso debido a los efectos secundarios cognitivos que pueden llegar a presentarse en algunos pacientes durante o después de aplicarla, como la pérdida de memoria, por ejemplo.

Pese a que diversas investigaciones han realizado estudios acerca de la TEC, aún se desconoce cómo ajustar los parámetros para que esta sea una terapia efectiva, minimizando los efectos secundarios graves.

Algunos de los parámetros corresponden a indicadores psicofisiológicos que se evaluaron con el protocolo de Viena, a partir de una unidad para la medición del tiempo en que un sujeto reacciona ante estímulos visuales y sonoros. En otras palabras, se puede medir el

tiempo que tarda un paciente en reaccionar (TR) ante un estímulo que puede ser visual, auditivo o ambos.

El TR se compone de dos tiempos: uno de decisión y otro motor, y se realiza a las 2, 4, 6, 12 y 24 horas después de cada aplicación de ES <sup>[10], [11]</sup>.

### III. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Este no es un artículo de carácter médico ni propone modificaciones a técnicas terapéuticas, sino que trata de técnicas de manejo de datos y su importancia. El consentimiento informado, entre otros documentos para realizar protocolos médicos, protege la información de pacientes y, para este caso, de médicos especialistas. Los datos fueron provistos solo para el análisis de la información y se permitió comentar el manejo que se les dio. La recolección de la información se ha llevado a lo largo de un periodo de 15 años, desde 2005 a 2020. La TEC es una terapia altamente costosa y la cantidad de pacientes que la reciben no es grande. Por eso, el periodo de captura y análisis de la información es de varios años. La práctica clínica corresponde a diversos especialistas en el área de psiquiatría, en adelante mencionados como especialistas del dominio.

Este artículo aborda el estudio de los TR de 183 pacientes que padecen esquizofrenia o trastorno depresivo mayor y a quienes se les aplicó la terapia TEC. La base de datos clínica es de carácter privado y pertenece al banco del Grupo Unidad de Investigación en Salud (UIS<sup>®</sup>), que es un conjunto de empresas mexicanas que desde 2005 trabaja en torno a la investigación en el tema de la salud ([www.uis.com.mx](http://www.uis.com.mx)). Se pretende distinguir los ajustes necesarios al tiempo de estimulación, cantidad de energía aplicada, frecuencia y ancho del pulso que hagan de la TEC una terapia más segura. Además, como parte del procedimiento normal que se exige para la aplicación de la TEC a un paciente, se utilizó la electromiografía, el electroencefalograma y el electrocardiograma para observar otras respuestas del paciente, así como una valoración de los efectos neuropsicológicos del mismo.

El estudio de los TR realizado por los especialistas del dominio consta de las cuatro pruebas siguientes que se aplicaron de acuerdo con el protocolo de Viena: visual simple (e5), auditiva simple (e6), visual compleja (e7) y visual-audible compleja (e8). Se registraron medidas a las 2, 4, 6, 12 y 24 horas después de haber realizado cada sesión de ES.

### IV. ANÁLISIS DE LA TEC MEDIANTE KDSM

Para el análisis de la información proveniente de la TEC y con el apoyo del especialista del dominio en la toma de decisiones, se utilizó la metodología KDSM, la cual consta de tres fases: 1) análisis basales de los pacientes (BLA, del inglés Individual Baselines Analysis), que consiste en realizar estudios previos de los pacientes y determinar las características relevantes; 2) análisis de los efectos del evento (EEA, del inglés Event Effects Analysis), en el que se realiza el análisis del efecto de cada evento de manera aislada y, 3) la producción de conocimiento (KP, del inglés Knowledge Production), que es donde se obtiene la caracterización de los patrones obtenidos en la fase anterior <sup>[7]</sup>.

La información de los pacientes está organizada en tres matrices: X, Y, Z. La matriz X, de la cual se muestra un extracto en la [Tabla 1](#), contiene el conjunto de características cuantitativas y cualitativas de los pacientes. En la matriz Y, mostrada en extracto en la [Tabla 2](#), se encuentran los registros de las medidas seriadas de cada parámetro de interés, es decir, las lecturas de las pruebas tomadas después de cada sesión de ES en las horas programadas. Y, finalmente, la matriz Z, de la que se observa un extracto en la [Tabla 3](#), contiene información sobre las características cuantitativas y cualitativas para cada ES.

Durante la fase BLA se analizó la situación inicial del paciente antes de aplicar la terapia TEC. Se extrajeron los basales de la matriz Y para realizar la construcción de la matriz  $Y_0$  de los tiempos basales. Después se llevó a cabo una representación del clúster jerárquico divisible <sup>[12]</sup> por medio de un dendrograma, utilizando el método Ward <sup>[13]</sup>. Para determinar los clústeres (clases) preliminares de los tiempos de reacción en la matriz  $Y_0$ , se utilizó la distancia euclidiana. Posteriormente, se hizo una proyección de la matriz X en la partición conseguida, para obtener atributos. Estos son analizados por el especialista del dominio, quien selecciona los de mayor relevancia y elige los clústeres que serán utilizados. Para dicho estudio, se utilizó la prueba de Chi-cuadrada y Kruskal-Wallis, estableciendo la significancia estadística de 0.05 para ambas pruebas. En la [Figura 1](#) se muestra el diagrama de cajas del atributo *edad* según la partición, lo cual permitió derivar las reglas.

TABLA 1  
EXTRACTO DE LA MATRIZ X

registro	edad	genero	fuma	peso	altura	diasepi	numero_t	tctotal	pentoth	penthmed	succto	sucme	impei	impf	postcri	energ	enercon	compli
363059	30	VARON	2	71	179	45	6	204	1200	200.0	300	50.0	1560	1240	529.0	882.0	7084.0	sin
437289	60	MUJER	0	50	155	147	6	188	1050	175.0	240	40.0	2380	2040	464.0	1537.2	6507.0	sin
499969	23	VARON	2	96	175	131	5	136	1050	237.2	300	60.0	1390	790	402.0	630.0	4867.0	cianosis
505652	52	VARON	0	75	173	90	5	116	825	165.0	195	39.0	1210	1730	416.0	1360.8	5141.0	hipoxia
522175	39	MUJER	4	87	160	72	10	230	1775	177.5	400	40.0	1260	1740	812.0	2217.0	8249.0	hipoxia
542693	29	VARON	2	65	165	146	9	287	2200	244.0	610	67.7	950	1590	802.0	1386.0	10598.0	sin
682257	52	MUJER	0	75	152	92	6	182	900	150.0	210	35.0	1340	1682	535.0	2116.8	3979.0	cefalea
782035	39	VARON	0	75	170	146	8	261	1700	212.5	540	67.5	1120	2580	683.0	1436.4	9721.0	sin
783945	82	MUJER	0	71	154	60	6	125	775	129.0	95	16.0	1600	1960	500.0	2444.4	5794.0	sin
789145	34	MUJER	2	60	150	390	8	182	2000	250.0	350	43.8	1780	2260	742.0	1411.2	6662.0	hipoxia
818755	70	MUJER	0	63	154	102	7	144	825	118.0	275	39.0	1910	2240	612.0	2116.8	3979.0	per memo
822836	73	MUJER	3	43	157	220	12	384	1450	121.0	300	25.0	2660	2470	856.0	5090.4	17469.0	cianosis
824083	32	VARON	2	77	165	19	6	187	1050	175.0	240	40.0	2800	2400	391.0	957.6	9095.0	arritmia

Acrónimos: diasepi = episodio actual; numero\_t = número total de ES; tctotal = tiempo total de la convulsión; pentoth = dosis total de pentotal; penthmed = dosis media de pentotal en cada sesión; succto = dosis total de succinilo; sucme = dosis media de succinil en cada sesión; impei = impedancia inicial antes del primer ES; impf = última impedancia después de completar la serie de ES; postcri = tiempo total de supresión tras la crisis; energ = energía total aplicada; enercon = energía de convulsión; compli = complicaciones médicas durante todas las sesiones.

TABLA 2  
EXTRACTO DE LA MATRIZ Y

registro	edad	orden	e5td2	e5tr2	e5tm2	e5td4	e5tr4	e5tm4	e5td6	e5tr6
063059	30	T1H2	378	589	211	409	730	321	364	632
063059	30	T2H2	446	768	322	383	702	319	429	711
063059	30	T3H2	458	780	322	430	705	275	408	644
063059	30	T4H2	476	760	284	416	666	250	452	714
063059	30	T5H2	460	687	227	410	665	255	453	711
063059	30	T6H2	380	726	346	375	635	260	444	603
437289	60	T1H2	292	567	275	374	616	242	355	669
437289	60	T2H2	330	646	316	386	738	352	338	516
437289	60	T3H2	390	696	306	342	686	344	381	763
437289	60	T4H2	321	605	284	352	644	292	372	673
437289	60	T5H2	378	664	286	339	691	352	337	689
437289	60	T6H2	320	643	323	320	634	314	406	749
499969	23	T1H2	321	479	158	308	462	154	384	524

Códigos: e5=visual simple; td= tiempo de decisión; tr= tiempo de reacción; tm= tiempo motor.

TABLA 3  
EXTRACTO DE LA MATRIZ Z

registro	edad	tiempo	pentotal	succinil	taprev	tapos	pulsoprev	pulsopos	oximetria	oximetriap	impedancia	amplitud
499969	23	27	250	60	110	224	88	135	96	72	1390	1
499969	23	26	200	60	190	210	98	100	96	56	1160	1
499969	23	29	200	60	140	170	94	96	96	55	1480	1
499969	23	19	200	60	145	195	99	111	95	62	810	1
499969	23	35	200	60	147	198	104	131	96	51	790	1
542693	29	32	200	50	136	128	82	88	98	59	950	1
542693	29	32	250	70	140	140	78	80	98	75	930	1
542693	29	36	250	70	147	152	77	87	95	85	880	1
542693	29	38	250	70	130	137	64	94	95	71	1590	1
542693	29	39	250	70	147	207	78	104	96	92	1580	1
542693	29	20	250	70	146	121	76	85	97	89	920	1
542693	29	35	250	70	152	187	74	100	98	65	1290	1
542693	29	26	250	70	147	126	69	82	96	73	2980	1
542693	29	29	250	70	132	120	64	85	97	76	1590	1
63059	30	33	200	50	154	158	102	92	98	75	1560	1
63059	30	39	200	50	140	150	102	112	94	87	910	1
63059	30	37	200	50	110	160	93	93	98	95	1060	1
63059	30	27	200	50	118	167	66	88	98	95	1050	1
63059	30	37	200	50	130	167	71	98	98	81	1010	1
63059	30	31	200	50	126	170	66	99	98	77	1240	1
824083	32	15	175	40	100	151	55	63	98	90	3000	1
824083	32	35	175	40	120	151	55	45	98	90	1260	1
824083	32	35	175	40	118	143	65	80	98	90	1650	1
824083	32	35	175	40	90	143	58	63	98	90	1970	1
824083	32	34	175	40	85	143	58	63	98	90	2400	1

Acrónimos: tiempo = tiempo de duración de la aplicación; pentotal = cantidades administradas de los fármacos; succinil = cantidades administradas de los fármacos; taprev = tensión arterial previa; tapos = tensión arterial posterior a la aplicación; pulsoprev = pulso previo; pulsopos = pulso posterior; oximetria = cantidad de oxígeno en la sangre; oximetriap = cantidad de oxígeno en la sangre previa; impedancia = cantidad de ohms en oposición a la corriente; amplitud = cantidad de corriente utilizada.

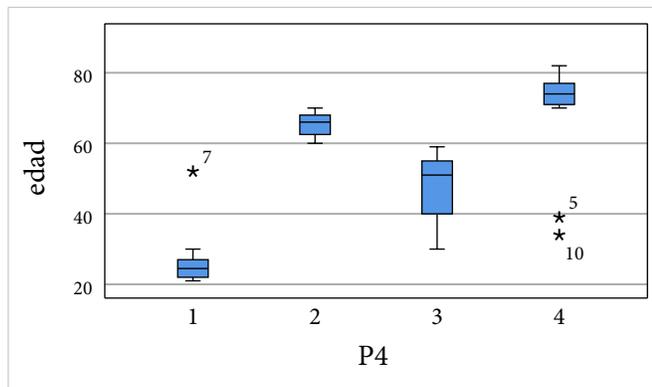


Figura 1. Diagrama de cajas del atributo *edad*, según la partición.

A continuación, se muestran las reglas derivadas en esta fase, representando al conocimiento mediante reglas tipo *crisp* [14]. De esta manera, se relacionan los clústeres con las reglas y quedan de la siguiente manera:

- Regla 1: Si *edad* pertenece a 21-30, clúster 1.
- Regla 2: Si *edad* pertenece a 31-59, clúster 3.
- Regla 3: Si *edad* pertenece a 60-70, clúster 2.
- Regla 4: Si *edad* pertenece a 71-82, clúster 4.

Al término de esta fase se analizaron los datos en conjunto con el especialista del dominio. También, se limpiaron los datos con información anómala.

Posteriormente, en la fase EEA se analizó el efecto de cada ES aislado, eliminando el factor de bloque del paciente para determinar cuáles pacientes pertenecen a qué clúster:

- Clúster 1: pacientes con edad entre los 21 y 30 años.
- Clúster 2: pacientes con edad entre los 60 y 70 años.
- Clúster 3: pacientes con edad entre los 31 y 59 años.
- Clúster 4: pacientes con edad entre los 71 y 82 años.

## V. RESULTADOS

A continuación, se describen los resultados de la implementación de la metodología KDSM para cada una de sus fases.

### Fase de análisis basal de los pacientes (BLA)

Se hicieron agrupaciones de forma jerárquica para hacer la clasificación de los tiempos de reacción, ya que estos muestran las condiciones con las que ingresaron los pacientes. Después, el especialista procedió a seleccionar las características con más relevancia en el dominio para

identificar el perfil de los pacientes y elegir las clases. En esta fase se determinaron las clases de los pacientes muy jóvenes, jóvenes, maduros y muy maduros. De esta fase resultan las reglas (si *edad* pertenece a 21-30, clúster 1; si *edad* pertenece a 31-59, clúster 3; si *edad* pertenece a 60-70, clúster 2; si *edad* pertenece a 71-82, clúster 4) que serán utilizadas en la siguiente fase.

### Análisis de los efectos de los eventos (EEA)

Se realizó el clúster jerárquico basado en reglas que se establecieron en la fase anterior y se obtuvo la agrupación en cuatro clústeres. El clúster 1 contiene pacientes cuya edad esta entre los 21 a 30 años; el clúster 2, pacientes con un rango de edades de 71 a 82; en el clúster 3 se encuentran pacientes con edades de 31 a 59 años; y, finalmente, el clúster 4, con pacientes que se encuentran entre 71 y 82 años. Fue posible llevar a cabo dicha fase gracias a la eliminación del factor de bloqueo.

### Producción de conocimiento (KP)

Se analizaron los efectos de ES de manera aislada para cada clúster. Fue posible observar en cuáles ES el paciente tuvo mejoría y en cuáles empeoró, además de poder distinguir los atributos de cada ES aplicado al paciente y representar el conocimiento obtenido.

La correcta implementación de la metodología KDSM permite al especialista encontrar información valiosa para apoyar la toma de decisiones.

## VI. CONCLUSIONES

En base al análisis de los datos, se pueden establecer algunas conclusiones.

Para este tipo de dominios donde los datos pueden organizarse en matrices X, Y y Z, se corrobora que sí es posible eliminar el factor de bloque que ejerce cada uno de los pacientes sobre la evolución de la terapia, para poder dar seguimiento de forma exclusiva a la evolución de la misma.

Se obtuvieron cuatro reglas referentes a los pacientes muy jóvenes, jóvenes, maduros y muy maduros. Mediante estas reglas se guió un proceso de clasificación que permitió encontrar el efecto de cada ES, de lo cual se mencionan ejemplos a continuación.

De acuerdo con el análisis de cada ES de forma aislada, se puede observar la reacción que tiene el paciente en cada sesión. Por ejemplo, un paciente 437289 al que se le aplicaron 5 ES, los 2 y 4 pertenecen al clúster 3, en los que mostró mejoría, y en los 1 y 5, en el clúster 4, donde empeoró. De igual manera, otro paciente, el 822836, al que se le aplicaron 11 ES, los 1, 2 y 8, que pertenecen al clúster 3, empeoró, y en los 3-7 y del 9-11 mostró mejoría. Esto es importante debido a que por cada sesión de ES se incrementa el efecto secundario, como la pérdida de memoria. Por lo tanto, la terapia de ES no se puede tratar de manera general debido a que se puede perder información importante que ayuda a optimizar el uso de la TEC.

## REFERENCIAS

- [1] J. Rodas-Osollo y K. Olmos-Sánchez, "Towards A Cognitive-Innovation Archetype", en *Proceedings of 254th The IIER International Conference*, San Petersburgo, Rusia, sept. 9-10, 2019.
- [2] K. Gibert y C. U. Cortés, "Weighting quantitative and qualitative variables in clustering methods", *Mathw. soft comput.*, vol. 4, no. 3, pp. 251-266, 1997.
- [3] I. de Miguel Beriain, "Medicina personalizada, algoritmos predictivos y utilización de sistemas de decisión automatizados en asistencia sanitaria. Problemas éticos", *DILEMATA*, no. 30, 2019.
- [4] A. Núñez, M. Á. Armengol y M. Sánchez, "Big Data Analysis y Machine Learning en medicina intensiva", *Med Intensiva*, vol. 43, no. 7, pp. 416-426, oct. 2019, disponible: <https://www.medintensiva.org/es-big-data-analysis-machine-learning-articulo-S0210569118303139>.
- [5] M. Álvarez, L. M. Quirós y M. V. Cortés, "Inteligencia artificial y aprendizaje automático en medicina", *Rev. méd. sinerg.*, vol. 5, no. 8, ag. 2020, doi: 10.31434/rms.v5i8.557.
- [6] J. F. Ávila-Tomás, M. A. Mayer-Pujadas y V. J. Quesada-Varela, "La inteligencia artificial y sus aplicaciones en medicina II: importancia actual y aplicaciones prácticas", *Atención Primaria*, vol. 53, no. 1, pp. 81-88, en. 2021, doi: 10.1016/j.aprim.2020.04.014.
- [7] J. Rodas y J. E. Rojo, "Knowledge discovery in repeated very short serial measurements with a blocking factor. Application to a psychiatric domain", *Int. J. Hybrid Intell. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 57-87, 2005, doi: 10.3233/HIS-2005-2104.
- [8] C. H. Kellner, J. Obbels y P. Sienaert, "When to consider electroconvulsive therapy (ECT)", *Acta Psychiatr Scand*, vol. 141, no. 4, pp. 304-315, abr. 2019, doi: 10.1111/acps.13134.
- [9] M. Landry, S. Lafrenière, S. Patry, S. Potvin y M. Lemasson, "The clinical relevance of dose titration in electroconvulsive therapy: A systematic review of the literature", *Psychiatry Res.*, 294, 13497, dic. 2020, doi: 10.1016/j.psychres.2020.113497.
- [10] N. Kerner y J. Prudic, "Current electroconvulsive therapy practice and research in the geriatric population", *Neuropsychiatry*, vol. 4, no. 1, pp. 33-54, feb. 2014, doi: 10.2217/npv.14.3.
- [11] SCHUHFRIED GmbH, "Vienna Test System: Psychophysiological Assessment", SCHUHFRIED GmbH, Moedling, Austria, catálogo, 2013.
- [12] D. A. Silva, "Estudio Experimental Comparativo de Diversos Métodos para Aprender Dominios Jerárquicos", tesis de maestría, Depto. de Sistemas Informáticos y Computación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2015. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10251/75372>
- [13] J. Gallardo, "Métodos Jerárquicos de Análisis Cluster", 2011. [En línea]. Disponible: <https://www.ugr.es/~gallardo/pdf/cluster-3>
- [14] M. D. Ruiz, D. Sánchez, M. J. Martín-Bautista, M. A. Vila y M. Delgado, "Reglas de Asociación Difusas para la Detección de Anomalías", en *Proceedings of the ESTYLF'14 XVII Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, Zaragoza, España, 2014, pp. 633-638.

# Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19

## *Considerations in designing robots for healthcare in the post COVID-19 world*

Mauricio Enrique Reyes-Castillo<sup>1</sup>, Andrés Joaquín Fonseca-Murillo<sup>1</sup>, Carlos Ricardo Cruz-Mendoza<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México.

### RESUMEN

A finales de 2019, la pandemia de COVID-19 se extendió rápidamente por todo el mundo. Como resultado de las dificultades derivadas de esta situación sanitaria emergente, se propuso utilizar robots en áreas médicas específicas. A partir de esto, el sector médico mundial aumentó el uso de robots de servicio para automatizar tareas repetitivas y riesgosas, así como para el transporte, almacenaje, entrega de alimentos, medicamentos y suministros. Sin embargo, la pandemia forzó la implementación de nuevos protocolos de interacción con los que se puso en evidencia el desarrollo incipiente de tales sistemas, demostrando su muy poca capacidad para hacer frente a las necesidades que conlleva la actual situación. En este artículo se presentan algunas consideraciones para la manufactura de sistemas, de acuerdo a criterios de diseño de productos biomédicos. Finalmente, se mencionan algunos problemas y retos que enfrentarán los desarrollos robóticos médicos en el futuro post pandemia.

**PALABRAS CLAVE:** robots de servicio; diseño de producto; equipos biomédicos; COVID-19; mundo post COVID-19.

### ABSTRACT

At the end of 2019, the COVID-19 pandemic spread rapidly throughout the world. As a result of the difficulties arising from this emerging health situation, it was proposed to use robots in specific medical areas. Thereon, world health sector increased the use of service robots to automate repetitive and risky tasks, as well as for the transport, storage, delivery of food, medicines and supplies. However, the pandemic forced the implementation of new interaction protocols, which revealed the incipient development of such systems, demonstrating their very little capacity to meet the needs of the current situation. In this article, some considerations are presented for the manufacture of systems according to design criteria for biomedical products. Finally, some problems and challenges, that medical robotic developments will face in the post-pandemic future are mentioned.

**KEYWORDS:** service robots; product design, biomedical equipment, COVID-19, post COVID-19 world.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Carlos Ricardo Cruz-Mendoza  
**INSTITUCIÓN:** Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas / UNAM  
**DIRECCIÓN:** Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, C. P. 04510.  
**CORREO ELECTRÓNICO:** cricardo.cruz@iimas.unam.mx

**Fecha de recepción:** 30 de septiembre de 2021. **Fecha de aceptación:** 1 de abril de 2022. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

El diseño industrial ha contribuido de manera multidisciplinaria al desarrollo de sistemas robóticos para la medicina. Las áreas con las que se interactúa son principalmente las ingenierías y los servicios de la salud. El acceso al desarrollo de nuevos productos derivados de la actual revolución industrial o Industria 4.0 (i4.0), necesita de la intervención de diferentes especialistas, además de considerar aspectos éticos, humanísticos y de sustentabilidad. La robótica encontró un nicho de crecimiento con la pandemia actual, ya que forzó nuevas formas y protocolos de interacción aumentando el uso de robots en hospitales y centros de salud. Los sistemas robóticos tienen diversas ventajas, principalmente por la poca o nula posibilidad de propagación directa del virus al utilizar el sistema en un modo humano-robot-humano. Con esta implementación, los entornos presentan una disminución en el riesgo biológico, considerando además otros factores de seguridad.

En los últimos años, el uso de robots en los entornos médicos ha ido en aumento [1]. Existen avances importantes respecto a sus aplicaciones orientadas a la solución de problemas de logística, específicamente durante el desplazamiento de objetos [2], [3], entrega de suministros [4] o manejo de sustancias peligrosas [5]. Los robots de servicio en las áreas médicas contribuyen a la transformación de los servicios de salud al realizar tareas de manera automatizada, de forma remota y liberando tiempo de servicio del personal. Los robots están mostrando un enorme potencial en la lucha contra este virus al realizar actividades rutinarias que requieren una gran cantidad de trabajo humano, principalmente en tareas como manipular suministros médicos y desechos de riesgo biológico, detección, pruebas, limpieza, cirugía, telesalud, telemedicina y servicios sociales en modo teleasistencia.

La situación sanitaria mundial evidenció que la generación actual de robots de servicio no está preparada para los retos que surgieron con la pandemia prevalente. Se requiere de sistemas capaces de apoyar con mayor eficiencia a especialistas, colaboradores y pacientes. Aunado a esto, el entorno latinoamericano sufre de un rezago en la manufactura, implementación e innovación para la robótica aplicadas al servicio de las personas, sin embargo, el entorno académico contribuye en cierta medida con investigación y desarrollo [6], [7]. En este trabajo se habla sobre las características de los

robots de servicio y las diversas aplicaciones implementadas en el contexto de la pandemia y se consideran, al mismo tiempo, las fases que plantea la Organización Mundial de la Salud [8] (Figura 1). Más adelante, se describen algunas consideraciones para el diseño, desarrollo y manufactura de robots. Se analizan también algunos factores de seguridad implícitos durante la interacción con personas y sistemas. Finalmente, se mencionan las características generales de un posible mundo post COVID dignas de considerar durante el diseño de sistemas robóticos.

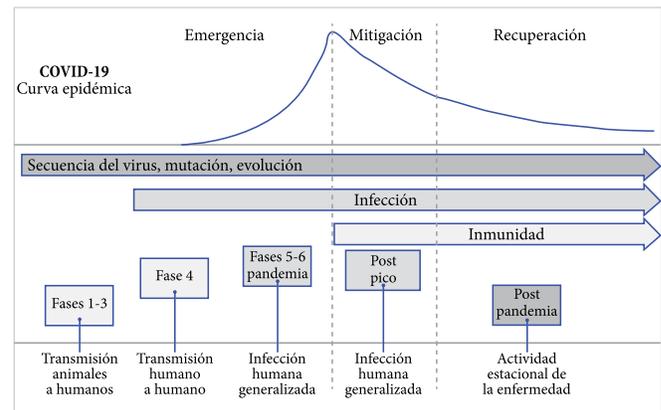


Figura 1. Curva epidémica de la COVID-19 y las fases de alerta de una pandemia [8].

### A. Los robots de servicio

El concepto *robot de servicio* se refiere a una entidad que es capaz de realizar un conjunto de comportamientos básicos utilizados durante la ejecución de tareas complejas [6], teniendo la facultad de llevar a cabo estas actividades en ambientes reales [9]. Su estructura de funcionamiento es gracias a la base de información ligada a sus capacidades, conocidas como habilidades o comportamientos, las cuales pueden representarse como un conjunto de procesos subsecuentes y organizados hacia el cumplimiento de una o varias tareas. Los robots de servicio pueden interactuar con personas o llevar a cabo colaboraciones con otros sistemas tecnológicos para un fin común [10].

Los robots de servicio utilizan sensores, motores y actuadores que les permiten reconocer las características del entorno, focalizar objetos, reconocer personas, captar audio o voz, trasladarse o navegar en un espacio definido, identificar áreas y manipular objetos. Dependiendo de los datos obtenidos por los sensores de los equipos, los robots pueden programarse para reaccionar de for-

ma inmediata o realizar tareas compuestas, que bien podrían entenderse como un conjunto de comportamientos básicos que complementan un objetivo mayor, p. ej., “Trae un vaso o ve a la cocina”. Para completar una tarea compleja, el sistema descompone la actividad en varias actividades simples hasta formar una secuencia compuesta que le permita avanzar progresivamente hasta completar el objetivo <sup>[11]</sup>. Un robot de servicio debería ser capaz seguir instrucciones con la información almacenada en su sistema o su base de conocimientos, aunado a la interpretación del entorno <sup>[12]</sup>.

El concepto y estructura funcional de un robot de servicio se determina a partir de la integración de los elementos físicos que lo conforman (hardware) y el conjunto organizado de datos que corresponden a la programación, algoritmos y arquitecturas (software). Un robot está definido por la relación existente entre las entradas y salidas del sistema, en donde sucede la transferencia de información entre lo registrado y la respuesta correspondiente. La capacidad de un robot de servicio se configura por: a) interpretar y reconocer representaciones externas en el entorno y b) especificar y generar una respuesta a través de procesos cognitivos artificiales, organizados por la ejecución de acciones y comportamientos en relación al estado de la tarea y su situación en el entorno <sup>[6]</sup>. Los robots de servicio se encuentran ligados a la ejecución de tareas específicas y el sistema puede adaptarse ante situaciones y ofrecer respuestas de acuerdo a la situación prevaleciente. Sin embargo, un sistema robótico expuesto a un ambiente variable reduce altamente su desempeño. Esto da pauta para implementar robots inmersos en áreas de aplicación perfectamente definidas, aumentando así la capacidad de ejecución del equipo y sistemas involucrados.

## B. LOS ROBOTS DE SERVICIO EN ATENCIÓN MÉDICA

Durante la pandemia de COVID-19 se han utilizado robots con distintas capacidades, entre los que destacan los robots de servicio o los especializados únicamente en interacción social. En la siguiente sección se revisan distintos sistemas, su avance tecnológico, las áreas en las que se implementaron, las tareas que efectúan y sus características formales.

### TELEMEDICINA

Uno de los robots diseñados para realizar tareas repetitivas que resultan estresantes para el personal de en-

fermería al interactuar con pacientes infectados, es el asistente semiteleoperado de enfermería TRINA, una versión actual del Rethink Robotics Baxter. El robot es un humanoide de doble brazo, con un torso (Rethink Robotics Baxter), una base móvil omnidireccional (HStar AMP-I) y pinzas con tres dedos en cada mano para proporcionar capacidades de manipulación y navegación en interiores (en la mano derecha tiene una pinza Robotics ReFlex). El operador utiliza una pantalla de telepresencia, un micrófono y altavoces para permitir comunicación bidireccional audiovisual con los pacientes y con el grupo de trabajadores sanitarios <sup>[13]</sup>.

El robot de telepresencia TEMI <sup>[14]</sup> permite atender y tratar a los pacientes de forma remota, aunque no fue diseñado originalmente para el cuidado de la salud. Para facilitar esta nueva tarea se le proveyó con una cámara térmica, un termómetro y otros sensores que permiten al personal del hospital realizar teleconsultas sin poner su salud en peligro. En un artículo, Yang *et al.* <sup>[15]</sup> muestran un sistema de teleoperación para la atención remota dentro de una sala de aislamiento, con el fin de reducir el riesgo de contacto entre los pacientes y el personal sanitario. Este sistema de telepresencia tiene una tableta montada en la parte frontal que se utiliza para hacer todos los días chequeos médicos remotamente, una función de activación por voz que facilita la interacción con el paciente y al mismo tiempo monitorea su estado emocional. Además, tiene la capacidad de realizar auscultaciones remotas con un estetoscopio de ultrasonido Doppler conectado al extremo de su brazo y puede entregar objetos, usando un brazo robótico de dos dedos.

En México también existen desarrollos de este tipo. Un proyecto apoyado por Intel y Amazon para la detección y escaneo de síntomas es ROOMIE BOT <sup>[16]</sup>, que cuenta con un termómetro y un oxímetro para detectar síntomas como fiebre y disnea, e incluye un avanzado sistema de cámaras que pueden detectar, analizar y reconocer rostros en tiempo real. Además, tiene un sistema de lenguaje natural para lograr conversaciones más fluidas. Este robot puede atender pacientes y preguntarles acerca de sus síntomas <sup>[17]</sup>, también es capaz de identificar otras afectaciones como cefalea, rinorrea, conjuntivitis, dolor torácico, odinofagia y tos.

### ESCANEO

Una forma económica y eficaz de ayudar a identificar y controlar la COVID-19 es la detección por escaneo de

síntomas relacionados. La plataforma robótica cuadrúpeda móvil de Boston Dynamics, Dr. SPOT, desarrollada para uso en exteriores [18], está equipada con termómetros de alta precisión y puede monitorear los signos vitales sin contacto. AIMBOT, de Ubtech, es otro robot que con sus cámaras HD e infrarrojas puede escanear hasta 200 personas por minuto [19]. También está MISTY, capaz de evaluar a una persona además de hacer preguntas pertinentes para la detección inmediata [20].

#### MANIPULACIÓN DE SUMINISTROS MÉDICOS

En el Hospital de la Universidad de Aalborg, en Dinamarca, se instalaron dos robots KUKA para ayudar al personal médico a clasificar las muestras de sangre. Anteriormente, el personal del laboratorio manipulaba las cajas de transporte a la llegada, extraía las muestras de sangre y las clasificaba para su posterior análisis clínico [21]. Para una aplicación que ayuda a los hospitales en las pruebas serológicas (estudio de anticuerpos en suero sanguíneo), se utilizó a YUMI, un robot diseñado en el Politecnico di Milano, en asociación con IEO, y producido por la compañía Abb robotics [22]. Otra tarea recurrente es la elaboración de vacunas; por tanto, se necesitan más robots para automatizar las tareas médicas repetitivas, como la citada anteriormente o como las pruebas de muestras.

#### MANIPULACIÓN DE DESECHOS DE RIESGO BIOLÓGICO

El método comúnmente utilizado para eliminar los desechos médicos generados en hospitales incluye la recolección, clasificación e incineración. Este último es un proceso que quema los desechos en un ambiente controlado. Sin embargo, los procesos más peligrosos para el personal médico son la recolección, la clasificación y el transporte de los desechos de riesgo biológico para su eliminación. Cleveland Clinic está utilizando 100 robots que recolectan los desechos en diferentes contenedores para su clasificación; cuando el robot ha recogido los desechos, se traslada a una habitación especial y los entrega a otra máquina para su esterilización e incineración [23].

#### HISOPADO NASOFARÍNGEO

El hisopado es el método tradicional utilizado para recolectar muestras en la prueba de detección en COVID-19. La toma manual expone inevitablemente al personal médico a posibles infecciones y este tipo de recolección

no puede satisfacer la gran demanda de análisis que se requieren. LifeLine Robotics creó comercialmente el primer robot autónomo para hisopado de garganta del mundo, el cual puede aminorar el trabajo al personal médico [24]. El robot prepara el recipiente para recoger la muestra, previamente etiquetado y fechado. Cuando el paciente abre la boca, el robot toma un hisopo e identifica los puntos correctos en la garganta mediante el uso de un sistema de visión artificial, toma la muestra y procede a colocar el hisopo en el recipiente, enrosca la tapa y la guarda, para iniciar de nuevo el protocolo.

#### LIMPIEZA

Los robots de servicio son ideales para prevenir enfermedades en lugares que son de alto riesgo para los humanos, tales como minería, plantas nucleares, mantenimiento y áreas de desinfección y limpieza en hospitales. Los robots de limpieza de servicio se pueden dividir en tres ramas principales: a base de luz, a base líquida y mixtos.

**Desinfección a base de luz.** Una forma común de eliminar patógenos es utilizar la tecnología ultravioleta (UV). Existen tres tipos de luces UV: UV-A (315 a 400 nanómetros), UV-B (280 hasta 315 nm) y UV-C (100 a 280 nm). Los rayos UV-A y UV-B provocan quemaduras solares en los seres humanos, sin embargo, los rayos UV-C, aunque son más intensos, no penetran la atmósfera y además pueden ser producidos artificialmente y se utilizan con frecuencia para la desinfección. Los rayos UV en general están relacionados con el desarrollo del cáncer, por lo tanto, estos servicios deben hacerse sin presencia humana y por estas razones los robots de servicio autónomos son ideales para la desinfección. El robot XENEX limpia superficies utilizando luz ultravioleta xenón pulsada (PPX-UV) [25]. El robot UVD es otro robot de servicio que se mueve de forma autónoma a través de una habitación, utilizando luz ultravioleta-C para atacar el ARN en un virus y el ADN en bacterias, destruyendo efectivamente la capacidad del virus para infectar a las personas y multiplicarse [26]. El AKARA ROBOT es un sistema para desinfección que puede detectar personas y apagar su emisor si es necesario. Básicamente, es una plataforma móvil con una sola lámpara UV-C unida a la parte superior [27]. El Robot UV del MIT se compone de una base comercial de AVA Robotics junto con un controlador de luz UV personalizado [28]. LAVENDER, el robot de desinfección inteligente UVC, destruye el 99.99 % de los patógenos utili-

zando luces ultravioletas y navega de forma autónoma y segura para la esterilización de espacios [29].

**Desinfección a base de líquidos.** Otra forma común de esterilización bacteriana es usar agentes líquidos. La empresa Aobo desarrolló un robot de desinfección a base de líquido equipado con un rociador de 360 grados, especializado en la desinfección y esterilización de áreas determinadas y cuenta con navegación láser y evasión ultrasónica de obstáculos [30]. GeekC Technology Co. desarrolló otro robot llamado JASMIN que utiliza agentes líquidos para una esterilización rápida y automatizada. Al igual que el robot UV Lavender de la misma compañía, son robots móviles autónomos. El robot AIMBOT de Ubtech también se adaptó para su funcionamiento con agentes líquidos en aerosol con la función de desinfectar áreas interiores, como hospitales y salas de atención médica [19]. Ai-aitech desarrolló un robot de desinfección comercial que utiliza válvulas automatizadas de alta presión para la esterilización [31].

**Desinfección de base mixta.** Existen robots que mezclan la desinfección a base de luz con la desinfección líquida para aumentar su eficiencia. Como ejemplo, el robot de desinfección M2 de Keenon desinfecta con cuatro lámparas UV-C de onda corta y un rociador de líquido que puede rociar en un radio de 5 metros y desinfectar una habitación hospitalaria con dimensiones promedio en 15 minutos [32].

#### INTERACCIÓN SOCIAL

Las acciones para reducir la propagación de COVID-19 están centradas mayormente en el distanciamiento, desde el aislamiento generalizado hasta el distanciamiento personal en espacios sociales, siendo los centros de salud los que requieren mayor control. El impacto psicológico por el cambio en las estrategias de convivencia para la atención interpersonal en hospitales y centros de atención, ha impulsado el desarrollo de robots interactivos de servicio y sociales. Otras capacidades de los robots de servicio, aunadas a su sistema computacional electromecánico programado, ensamblado y diseñado para su integración en entornos sociales, es la generación de comportamientos reactivos dirigidos al cumplimiento de tareas, basándose únicamente en comunicación por medio de interfaces gráficas y naturales humanas como lenguaje, gesticulación, seguimiento ocular, expresión facial, comportamiento emocional y lenguaje corporal, entre otras [33], [34], [35]. Esta situación estimuló la crea-

ción de robots capaces de compartir las cargas de trabajo en tales entornos. Pal Robotics adaptó sus robots a la atención social, explorando formas de combatir la COVID-19 [36]; similar a TEMI, Pal Robotics ARI [37], fue diseñado para usos diversos. ARI se utilizó como recepcionista en hospitales con el fin de aclarar dudas generales y controlar el flujo de nuevos usuarios en salas de ingreso, además de realizar seguimiento y asistencia a los afectados por COVID-19 que requieran ser aislados. ARI se puede teleoperar, ofrece interacciones sociales continuas y se adhiere a los regímenes de tratamiento con menor riesgo de propagar el virus.

Las empresas UBTECH Robotics (hardware) y ZoraBots (software), a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), han donado a Hospitales de Ruanda cinco robots CRUZR para combatir la COVID-19 [38]. Estos robots se utilizan para monitorear la temperatura de los trabajadores sanitarios y los pacientes. Además, según los trabajadores, el robot podría hablar con personas en la lengua materna (francés), lo que muestra una ventaja considerable en la transferencia de información. La empresa Diligent Robots ha desarrollado el robot MOXI para ayudar al personal médico. MOXI puede entregar muestras de laboratorio, buscar artículos del suministro central, recolectar productos para pacientes, distribuir equipo de protección personal y entregar medicamentos [39].

La revisión sobre los sistemas robóticos de servicio en atención médica, sirve para entender las necesidades emergentes que establecen una base en su diseño y desarrollo. Con este fin, se presenta una tabla con las características de los robots mencionados considerando las fases de la pandemia, las áreas de uso en centros hospitalarios, su aplicación, grado de avance, las capacidades y los diferentes usuarios que intervienen (Tabla 1). De esta forma, se pretende abrir el horizonte respecto al estado del arte, los parámetros generales para su diseño y las necesidades para desarrollos a futuro, tomando en cuenta los posibles retos a los que se enfrenta su implementación. Se encontró también que el diseño estructural es recurrente en los sistemas analizados (Figura 2), con cuatro conceptos básicos: 1) limpieza y desinfección, 2) humanoides de servicio o sociales, 3) teleoperación y 4) manipulación en plataformas móviles o estáticas.

El desarrollo e implementación de robots de servicio en hospitales, requiere de conocimientos multidisciplinarios. Por tal motivo, para el diseñador de artefactos mé-

TABLA 1  
REVISIÓN GENERAL DE SISTEMAS ROBÓTICOS DESARROLLADOS DURANTE LA PANDEMIA DE COVID-19

ROBOTS	FASE	ÁREAS	APLICACIÓN	AVANCE	CAPACIDADES	USUARIOS
TRINA	Fase 5 a fase post pandemia	Cirugía general, cuarto de recuperación	Telemedicina	En desarrollo	Plataforma móvil y estática. Manipulación	Operador, médico y especialista de la salud
Temí	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, control de infecciones, trabajo social, cuidados en el hogar	Telemedicina	En activo	De interacción humana. Plataforma móvil	Operador y paciente
Robot de Yang et al.	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, seguridad, control de infecciones	Telemedicina	En desarrollo	Plataforma móvil y estática. Manipulación	Operador y paciente
Dr. Spot	Fase 5 y 6	Admisión, control de infecciones	Telemedicina, escaneo	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Pacientes y visitantes
Aimbot y Misty	Fase 5 a fase post pico	Admisión	Telemedicina, escaneo	En activo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Pacientes, visitantes y médicos
Kuka Robots	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, muestreo de sangre	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
ABB YUMI	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, desarrollo de vacunas	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
Zen Robotics	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, riesgo biológico	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
Lifeline Robotics	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, hisopado	En desarrollo	Plataforma móvil, Manipulación	Operador y paciente
Xenex, UVD robots, Akara robot, MIT-UV, Lavender	Fase 5 a fase post pandemia	Áreas generales: cirugía, cuidados intensivos, radioterapia, control de infecciones, recuperación	Limpieza. Desinfección Base UV	En activo	Plataforma móvil	Operador
Ai-aitech, Aobo, Aimbot, Jasmin, Keenon	Fase 5 a fase Post pandemia	Áreas generales	Limpieza. Desinfección Base líquida y mixta	En activo	Plataforma móvil	Operador
PAL/ARI, Cruzr	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, cuidados de salud y seguridad	Social Humanoide	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Operador y paciente
Moxi	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, cuidados de salud y seguridad	Social Humanoide	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Operador, paciente, médico

dicos es importante tener en cuenta la bioingeniería, la ingeniería mecánica, biomédica, eléctrica, electrónica, química y computacional, además de los factores humanos, el diseño industrial, la manufactura y consideraciones sobre impacto ambiental.

En los siguientes apartados se abordará de manera breve el proceso de diseño para productos biomédicos presentados en la [Figura 3](#), acordes con los factores generales de ingeniería y diseño <sup>[40]</sup>.

## II. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La creación de robots para entornos de salud debe considerar el proceso de diseño para dispositivos biomé-

dicos que se nombró anteriormente, ya que en este se encuentran varios factores esenciales, sobre todo los concernientes a usuarios, usabilidad y manufactura, acordes con las tecnologías emergentes dentro de nuestro entorno. Además, es importante tomar en cuenta las actuales pautas de seguridad para robots de cuidado personal, ya que influyen directamente en el diseño de tales sistemas. Todo esto se relaciona y surge al tener en cuenta el ciclo de vida del producto, el cual servirá de esquema general para el desarrollo.

A continuación, se describen algunas consideraciones basadas en dicho ciclo, incluyendo además una breve descripción del mundo post pandemia.

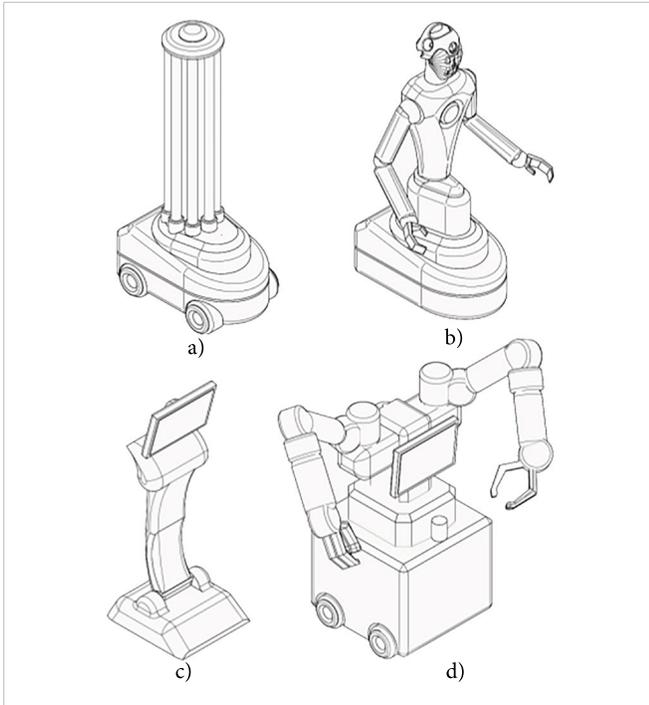


Figura 2. Configuración formal y características generales de los robots implementados en los entornos médicos durante la pandemia por COVID-19: a) Limpieza, b) Humanoides sociales y de servicio, c) Teleoperación / Telemedicina y d) Manipulación (móviles o fijos). Elaboración de los autores.

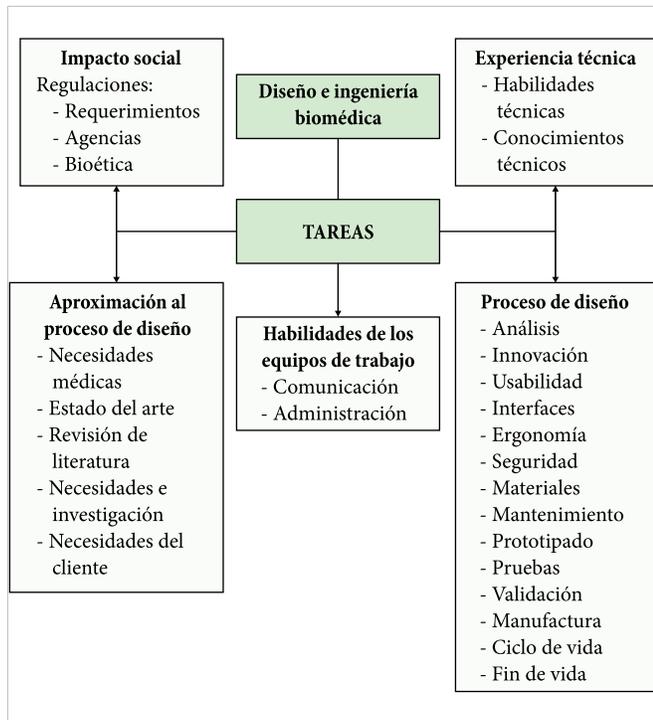


Figura 3. Las tareas a considerar en el diseño e ingeniería biomédica paralelas al proceso de diseño. Basado en los conceptos desarrollados por King et al. [40].

## A. USUARIOS

Los productos biomédicos tienen generalmente como usuario final al paciente, sin embargo, este no está a cargo de la operación ni del mantenimiento del dispositivo. Para esto se debe considerar además a los técnicos de instalación encargados de poner en marcha los equipos, a los instructores que facilitan la información sobre su funcionamiento y al personal que los opera. A fin de cuentas, técnicos, capacitadores, personal médico y de mantenimiento, son considerados también como usuarios, ya que son capaces de determinar sobre los procedimientos, la configuración, los esquemas de mantenimiento e incluso incidir sobre el rediseño y mejora de un dispositivo a fin de sacar el máximo provecho en beneficio del paciente.

## B. USABILIDAD

La usabilidad se refiere a la facilidad relativa con la que un dispositivo es controlado o manipulado, de preferencia, utilizando la mínima carga cognitiva y considerando la experiencia del usuario. La definición de usabilidad se encuentra en la norma ISO 9241-11 [41], donde se menciona que un dispositivo debe permitir a los usuarios alcanzar objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción dentro de un entorno definido. Se espera que la usabilidad incentive la productividad en la tarea destinada al equipo, aumente la seguridad y reduzca el esfuerzo durante su operación [42].

Regularmente, la seguridad en los dispositivos médicos está relacionada con la usabilidad, ya que se centra en la minimización o reducción de posibles errores durante el uso y el mantenimiento. Además, el dispositivo debe señalar inmediatamente una falla o indicar cuando exista riesgo en su operación. Generalmente en este proceso se utilizan medios simples, como señales visuales o auditivas. Es deseable que los instructivos informen sobre los tipos de errores posibles y presenten instrucciones sobre cómo eliminarlos para lograr poner el sistema en marcha con prontitud. En todos los casos, la documentación al respecto deberá estar a disposición de los operadores y técnicos encargados [40].

## C. MANUFACTURA

Uno de los objetivos en el diseño de dispositivos médicos es el de procurar la fabricación continua a través de procesos industrializados, asegurando la calidad,

confiabilidad, rendimiento y disponibilidad, teniendo en cuenta la rentabilidad en términos comerciales. Un objetivo del Diseño para la Fabricación (Design For Manufacturing o DFM) es reducir el número de componentes y partes de un dispositivo; un diseño simple o bien solucionado, facilitará la producción en línea <sup>[43]</sup>. El DFM permite la reducción de costos, aumenta la calidad, la confiabilidad y favorece el mantenimiento del producto. La fabricación de dispositivos médicos sigue la legislación de salud pública de cada país para asegurar el control de calidad en los procesos de diseño. Un factor esencial es la selección de materiales, ya que incide directamente en su industrialización. Esta se realiza de acuerdo con los siguientes factores: físicos, mecánicos, propiedades térmicas y eléctricas, resistencia química, capacidad de esterilización, durabilidad a largo plazo, vida útil y envejecimiento, entre otros <sup>[40]</sup>, <sup>[44]</sup>.

Metales como el aluminio y el acero, las diferentes aleaciones y los plásticos son comunes en la fabricación de equipos médicos. También los polímeros se utilizan ampliamente. Además de los factores de selección mencionados anteriormente, el uso de polímeros debe considerar las propiedades de los lixiviables y extraíbles, la vida útil y el envejecimiento, la unión y soldadura, los plásticos de grado médico y los suplementos. Es necesario conocer datos sobre toxicidad, irritación de la piel, ojos y superficies mucosas, sensibilización, hemocompatibilidad, genotoxicidad, carcinogenicidad y efectos durante los procesos de industrialización, incluidos los efectos sobre el medio ambiente.

En la investigación de McKeen <sup>[44]</sup> se especifican muchos de los plásticos que habitualmente se utilizan en los dispositivos médicos. El análisis se centra en polímeros de grado médico, propiedades químicas adecuadas, orientación y aplicaciones de esterilización. De estos, los más utilizados en dispositivos médicos son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster (SP), ácido poliláctico (PLA y otros plásticos bioabsorbibles), policarbonato (PC), cloruro de polivinilo (PVC), polietersulfona (PES), poliacrilato (acrílico, PMMA), hidrogel/acrilato, polisulfona (PSU), poliéter éter cetona (PEEK), elastómeros termoplásticos, elastómeros, siliconas, poli-p-xilileno/parileno y fluoropolímeros. La información derivada de materiales y procesos es proporcionada por un especialista en fabricación industrial que debe ser consultado en etapas tempranas del desarrollo.

La situación sanitaria actual y la disponibilidad de tecnologías para la impresión 3D ha impulsado la utilización del modelado por deposición fundida (FDM) y el proceso de fabricación aditiva por los siguientes factores <sup>[45]</sup>: a) capacidad de impresión, b) material accesible, c) precisión, d) volumen de las piezas e) tiempo de fabricación y, f) replicabilidad. El uso de polímeros en la fabricación aditiva tiene también aplicaciones en las áreas médica y biomédica <sup>[46]</sup>. Los productos manufacturados pueden favorecer los procesos de desinfección y esterilización para su uso en los centros de salud. Uno de los materiales utilizados para imprimir piezas tridimensionales con aplicaciones en áreas médicas es el filamento de ácido poliláctico (PLA), por sus capacidades de esterilización.

En Livingston *et al.* <sup>[47]</sup> se evaluaron los siguientes métodos de esterilización de materiales: altas temperaturas, radiación ultravioleta, ozono, óxido de etileno, peróxido de hidrógeno, alcohol isopropílico, rayos gamma o electricidad, microondas, sulfato de cobre, azul de metileno, yodo y cloro sódico. En Wady *et al.* <sup>[48]</sup> se evaluó la eficiencia de la radiación ionizante como proceso de descontaminación, mostrando que el uso de rayos gamma con rangos específicos en varios termoplásticos (incluido el PLA) aumentaba su volumen y causaba daños estructurales. Valente *et al.* <sup>[49]</sup> muestra que la luz ultravioleta y otros métodos de radiación no influyen en la morfología de la fibra de PLA y su alineación. Por otro lado, los rayos ultravioletas tipo C (200 a 290 nanómetros) tiene un efecto germicida y se ha utilizado ampliamente para esterilizar espacios confinados en hogares, áreas médicas <sup>[50]</sup> y espacios comerciales e industriales. Investigaciones anteriores muestran además que la radiación ultravioleta puede inactivar los coronavirus, incluidos el SARS-CoV y el MERS-CoV.

#### D. CICLO DE VIDA

La duración de los dispositivos médicos varía según el entorno, los consumibles, los materiales desechables y los componentes funcionales básicos. Las etapas del ciclo de vida de un dispositivo médico se muestran en la [Figura 4](#) y son las siguientes: diseño, desarrollo, prueba, fabricación, transporte, instalación, prueba en sitio, operación, limpieza, mantenimiento, retiro del servicio y desmantelamiento o eliminación de los componentes, especialmente si están peligrosamente contaminados y la esterilización no es posible.

Es importante analizar cada etapa del ciclo de vida, ya que las decisiones en etapas tempranas inciden en las últimas. Esto sugiere que el flujo entre etapas debe involucrar el número mínimo de variables. Por ejemplo, uno de los principales desafíos es identificar las condiciones peligrosas de acuerdo con la complejidad respecto a diversos elementos del sistema, producto y ambiente [40]. La parte final del ciclo de vida del producto especifica el desmantelamiento y remoción de componentes, sin embargo, en esta etapa es posible obtener beneficios de varias formas: evitar el desperdicio de los componentes, obtener un beneficio económico del producto y reducir el impacto ambiental. La fase *fin de vida útil* (End Of Life, EOL) comienza después del desmontaje y los componentes recuperados pueden reutilizarse, remanufacturarse, reciclarse o desecharse en vertederos especializados [51]. Una selección correcta en los diferentes métodos de análisis tipo EOL, aumenta el valor del producto recuperado.

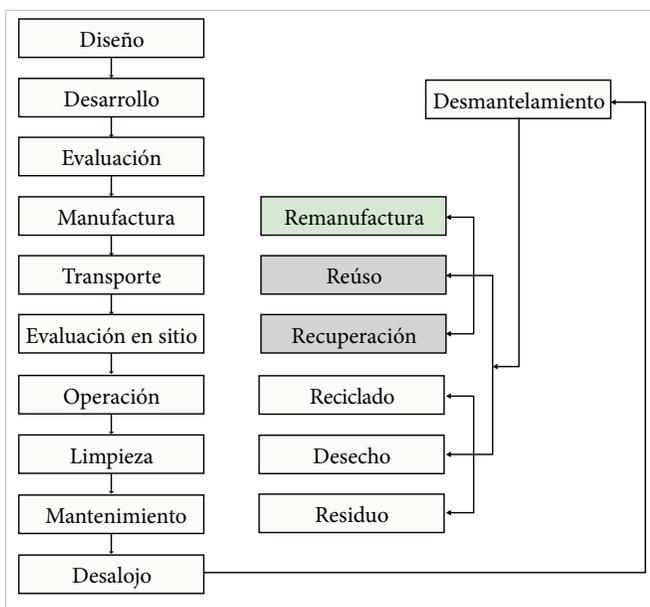


Figura 4. Concepto de ciclo de vida del producto. Diseño propio, basado en [40], [51].

### E. PRUEBA

La prueba es un proceso predominante en todas las etapas del diseño y se puede utilizar para evaluar y validar el progreso. Por ejemplo, una vez que se ha desarrollado un concepto avanzado para la operación del sistema se puede construir un modelo físico para evaluar su comportamiento en escenarios definidos. El modelo de prueba se puede crear con detalles realistas para obtener información, tanto sobre interfaces [52] como

antropometría, ergonomía, dimensiones funcionales, elementos psicológicos (señales y alarmas), etiquetado (gráficos y texto), pantallas visuales, controles interactivos, retroalimentación, indicaciones, y seguridad [40]. Este modelo permite, además, el análisis del trabajo mental del operador y la secuencia de uso.

En general, la usabilidad se evalúa a través de las interfaces del dispositivo, que son los elementos utilizados para operarlo o bien los que brindan información al personal médico y a los técnicos. Es común evaluar la interacción y las opiniones del usuario a través de escalas y encuestas tipo Likert, particularmente en aspectos que están condicionados a criterios personales (sensibilidad de alarmas, brillo de pantalla, etc.) [53]. Las pruebas del dispositivo antes de su fabricación final son altamente dependientes de un prototipo. En el caso de la fabricación, existen criterios internacionales sobre evaluación biológica de productos y materiales médicos que se pueden encontrar en la norma ISO 10993 [54]. Las pruebas son esenciales para indicar debilidades, comportamientos, características y modos de falla, independientemente de la técnica industrial seleccionada. Las pruebas se realizan básicamente para brindar al equipo de trabajo datos e información básica sobre compatibilidad de funciones con otros equipos [40], verificación (evaluación del producto basada en estándares establecidos, herramientas para la planificación de inspecciones y control de calidad) y validación (el sistema cumple con los requisitos necesarios de acuerdo con la especificación).

Las pruebas son esenciales, ya que proporcionan suficiente información para lograr mejoras, cuyo objetivo final es la satisfacción del usuario, la salud del paciente, el funcionamiento adecuado y la facilidad de mantenimiento. En King y Fries [40] se ofrece una descripción extensa de pruebas y métodos para el diseño de dispositivos médicos. Las más relevantes son: pruebas de hardware y software, funcionales, robustez, estrés, seguridad, regresión, biocompatibilidad de materiales, pruebas de esterilización y demostración de confiabilidad. Esta última se realiza al final del ciclo de desarrollo del producto.

### F. LINEAMIENTOS DE SEGURIDAD PARA ROBOTS USO PERSONAL

La interacción personal con robots de servicio inmersos en entornos sociales es determinante para asignar los parámetros y los alcances de los sistemas robóticos.

La seguridad durante la implementación es un elemento esencial, capaz de definir y orientar las posibilidades de interactividad. Hasta ahora, se ha hablado en mayor medida sobre aspectos relacionados a las posibilidades y conceptos básicos para la manufactura de los sistemas, sin embargo, es importante describir los lineamientos de seguridad apegados a los aspectos técnicos que involucran directamente la intervención de los usuarios. De manera general y de acuerdo al entorno de uso, es necesario identificar los peligros asociados al riesgo laboral cotidiano, independientemente de la presencia de robots, para, posteriormente, atender los principios, normas y estandarizaciones que orienten al diseño del sistema.

Para el presente documento se toman en consideración los principios de la norma ISO 13482: 2014 <sup>[55]</sup>, en donde se especifican los requisitos y pautas para el diseño seguro, las medidas de protección y la información para el uso de robots de cuidado personal. En este caso, se pone especial atención en los robots de servicio móviles y de asistencia. Prácticamente, se busca establecer las medidas para garantizar la seguridad de los usuarios directos que compartan el mismo espacio que los equipos. El ciclo de vida de los productos de diseño y las norma descritas comparten criterios para la configuración general de un robot, esencialmente en las pruebas de uso, inspección, medición y análisis de los resultados, siendo la siguiente secuencia la sugerida para considerar su posible implementación: 1) inspección del producto, 2) ensayos prácticos (ya sea en laboratorio o en sitio), 3) establecimiento de métricas, 4) observación durante la operación, 5) examinación de información técnica (circuitos, software, hardware), 6) evaluación de riesgos basada en tareas y 7) revisión de planos constructivos de diseño y documentación. En términos de implementación funcional, las consideraciones se rigen por los siguientes aspectos.

**Energía.** Este rubro se relaciona con los riesgos durante el manejo de baterías y conexiones, el suministro energético durante el inicio y arranque del sistema, el potencial electrostático y el diseño de cubiertas para evitar contacto directo con sistemas eléctricos y electrónicos. Se toma en cuenta también la accesibilidad a baterías, componentes, circuitos y demás sistemas que puedan necesitar mantenimiento. Es necesario considerar un espacio adecuado para almacenamiento del robot y recarga de energía. Otro riesgo existente, y que puede afectar el desempeño de los equipos electromecánicos,

es la interferencia electromagnética generada durante la activación y el uso.

**Emisiones.** Cualquier tipo de emisión de los sistemas que ponga en riesgo la integridad de los usuarios debe ser identificada y controlada dentro de rangos aceptables. En este rubro, el ruido de motores y actuadores puede repercutir en malestares o pérdida de la audición por la exposición en periodos prolongados o puede además detonar otros trastornos. El ruido ultrasónico con ondas sonoras de frecuencias arriba del umbral del oído humano (de más de 20 kHz) también se toma en cuenta.

**Movilidad.** Los robots que pueden desplazarse en espacios y que tienen componentes articulados, pueden activarse de manera no prevista, impactando estructuras, muebles, objetos ornamentales y en el peor de los casos a los propios usuarios. Por un lado, es necesario un control de velocidad adecuado en su desplazamiento y en el movimiento de sus estructuras (brazos, cabeza, cámaras, otros) y, por otro lado, debe tenerse en cuenta el uso de protecciones fabricadas con materiales y formas que reduzcan el riesgo de lesión. Los elementos de los sistemas deben estar asegurados, contenidos y diseñados para evitar contactos no previstos, así como desprendimientos no deseados.

**Configuración formal del robot.** El diseño formal del robot debe ser adecuado para mitigar lesiones en el caso de una colisión con los usuarios por una falla técnica. Es importante integrar materiales acojinados o suaves y evitar el uso de geometrías con filos.

**Diseño de interfaces.** El sistema puede ser operado a través de interfaces gráficas y naturales. En el caso de las primeras, se consideran los controles de mando a través de paneles digitales o de mecanismos como botones y palancas. Además, en el caso de las segundas se utiliza el reconocimiento de voz y el comportamiento emocional o lenguaje corporal. Estos elementos deben ser comprensibles, legibles, fiables y eficaces para conseguir las metas esperadas, de acuerdo a los objetivos del sistema y expectativas del usuario.

**Ergonomía de los usuarios.** Los aspectos físicos y mentales de los usuarios pueden verse alterados durante la interacción con sistemas robóticos. Para los aspectos físicos (ergonomía física), el diseño debe considerar la antropometría para reducir los riesgos físicos por pos-

turas que afecten el sistema musculoesquelético, derivados de la interacción prolongada o bien durante su transporte, instalación, programación, mantenimiento, reparación e incluso desmantelamiento. Por la parte mental (ergonomía cognitiva), es necesario considerar los criterios culturales, sociales, emocionales, nivel educativo y de edad de los usuarios, para entender así cómo perciben y responden al comportamiento del sistema, p. ej., la velocidad de desplazamiento, la aceleración durante el movimiento de componentes como brazos, cuello, cabeza; la expresión facial o emocional [56], el lenguaje corporal y seguimiento ocular [57].

Se han establecido métricas para evaluar los aspectos negativos que emergen durante la interacción, como la Escala de Actitudes Negativas hacia los Robots (The Negative Attitudes towards Robots Scale, NARS) [58], que es un indicador para evaluar la interacción en corto y largo plazo entre humanos y sistemas. Otro elemento importante respecto a la ergonomía cognitiva es el diseño formal, en donde se han realizado estudios como el propuesto por Masahiro Mori, llamado el Valle Inquietante (Uncanny Valley) [59], sobre el concepto de estética en el diseño y el rechazo hacia robots con forma muy cercana a lo humano, antropomórficos.

**Error humano.** Existen varios factores de riesgo en donde se involucran fallas derivadas de la interacción con los usuarios, ya sea en la toma de decisiones incorrectas por desconocimiento del sistema, mal mantenimiento, reparación inadecuada o descuido entre otros. Los robots personales deberán diseñarse procurando reducir posibles daños causados en los momentos en que quedan expuestos sus mecanismos, cables, ruedas, engranajes y otros componentes. Es importante integrar botones de emergencia, topes de protección, controles de velocidad y estabilidad, así como desarrollar manuales para usuarios y técnicos de mantenimiento.

El conjunto de aspectos antes mencionados está centrado en los elementos físicos (hardware) dejando de lado aquellos que tienen que ver con las estrategias computacionales, arquitecturas robóticas y de programación (software). Es necesario además tomar en cuenta, los riesgos derivados de la interacción dentro de los espacios a implementar.

Por último, es importante señalar que en las áreas de salud y en otros ambientes, los espacios físicos se fueron adaptando a las medidas sanitarias emergentes, como

respuesta a la pandemia y a sus repercusiones a futuro.

#### D. EL MUNDO POST COVID

La fase post pandémica se está configurando en el ámbito mundial de diferentes maneras en los esquemas socioculturales. En un posible mundo post COVID se tomarán en cuenta diferentes fenómenos que afectan los comportamientos durante la interacción entre individuos, en gran medida derivados del aislamiento e incertidumbre en la calidad de vida. Esta situación está dando lugar a la expansión masiva de recursos digitales, descentralización de centros de trabajo, de salud y académicos, así como al desarrollo de tecnologías que limiten la interacción física interpersonal [60], [61]. Reflexionando al respecto, es posible considerar una próxima generación de robots centrada en las áreas médicas, resultado de las experiencias actuales, incluyendo, las preocupaciones éticas emergentes, respecto a los límites de la interacción con estos sistemas [62].

La pandemia mostró las prioridades y diferencias entre los recursos destinados a la salud pública en los países desarrollados y en vías de desarrollo. En México se hicieron esfuerzos en el desarrollo de robots de servicio para entrega de alimentos y suministros médicos, pero los recursos fueron en su mayoría asignados a la compra de equipo de protección y de respiradores artificiales, lo que hizo que la inclusión de robots de servicio no fuera un tema de relevancia. Los robots de servicios que se muestran en este documento vislumbran las principales habilidades de los sistemas desarrollados hasta el día de hoy. Es necesario diseñar sistemas con habilidades innovadoras y diferentes a las existentes, como apoyo a la sociedad y en el entorno post COVID inmediato.

### III. DISCUSIÓN

Durante la última década, el uso de robots en las áreas de salud ha tenido un avance considerable, sobre todo en trabajos de desinfección, de logística y de comunicación entre pacientes, doctores y familiares. Adicionalmente, los desarrolladores han implementado en los sistemas robóticos, estrategias computacionales como la inteligencia artificial para la detección de casos potenciales de COVID. Algunos de los sistemas robóticos revisados en este documento se diseñaron específicamente para minimizar el impacto por COVID-19, como por ejemplo, los equipos modificados a partir de sistemas preexistentes y que su implementación está en fase ex-

ploratoria. Entre estos se encuentran los sistemas funcionales diseñados para fines de limpieza y desinfección que tienen una alta efectividad en espacios médicos. De acuerdo a la [Tabla 1](#), los sistemas activos no involucran la interacción directa con el usuario, salvo con el operador que activa el sistema para después desalojar el área que será descontaminada y quién además está a cargo en todo momento de su desempeño. Por tanto, son los sistemas robóticos que interactúan de manera directa y constante con usuarios los que se encuentran aún en fase experimental. Se puede entender así que realizar estudios en interacción humano-robot (Human Robot Interaction, HRI) es de vital importancia.

En la actualidad y ante la situación global de emergencia sanitaria aún prevaleciente, el desarrollo de este tipo de sistemas se enfrenta a distintos problemas y su solución va más allá del contexto inmediato de aplicación. De manera general, es posible afirmar que el principal obstáculo radica en la falta de investigación aplicada y el rezago existente en la tecnología local. En el ámbito global, se impulsó el desarrollo durante la fase de emergencia, sin embargo, las prioridades eran de índole totalmente médico. Aunado a esto, la integración de robots en entornos sociales es, como se mencionó, altamente compleja, los estudios en HRI son insuficientes en el entorno inmediato y aun en países avanzados estos análisis no son un tema dominante en la investigación.

Otro problema al que se enfrenta esta tecnología es la demanda de recursos tecnológicos, ya que el acceso a componentes asequibles y de alto rendimiento es insuficiente. Actualmente, el comportamiento de los robots (habilidades), depende en mayor o menor medida del acceso a internet, sin embargo, la infraestructura médica es aún deficiente. En este sentido, es necesario considerar una reestructuración de las instalaciones para alojar sistemas robóticos utilitarios, con un desempeño eficiente y bajo el control de especialistas con formación en áreas médicas, ingenieriles y de diseño. Aunado a esto, la pertinencia de los sistemas en el entorno es un tema que requiere mayor profundización.

Lamentablemente, de acuerdo a los datos mostrados en la [Tabla 1](#), los desarrollos se encuentran en un estado medio de madurez. Este nivel tecnológico, respecto al diseño de artefactos y sistemas, puede determinarse tomando en cuenta los indicadores proporcionados por

la NASA <sup>[65]</sup>, nueve niveles que abarcan desde los principios básicos de funcionamiento hasta los ensayos de prueba en el entorno final de implementación, en este caso el contexto médico.

Las estrategias actuales de adaptación en los espacios de salud requieren cambios que involucran a médicos, pacientes, administradores y a la industria <sup>[63]</sup>, <sup>[64]</sup>. Estas adaptaciones se enlistan a continuación y es necesario considerarlas durante el diseño de robots de servicio:

- Telemedicina, asistencia sanitaria, telesalud, asesoramiento en línea, eHealth.
- Cuidados en el hogar.
- Logística, planificación, coordinación y comunicación.
- Protección contra virus y saneamiento.
- Evaluación inmunológica continua.
- Rediseño y reorganización laboral.
- Apoyo psicológico.
- Educación médica continua.

La solución a los retos planteados recae principalmente en el entorno académico, abriendo espacios a la discusión en el uso de tales sistemas y generando conocimiento con fines de diseño, aplicación y actualización continua. La coordinación de grupos para el desarrollo de iniciativas académicas es un factor esencial en la capacitación de especialistas y técnicos. Un ejemplo de esto son los equipos participantes en las diversas competencias internacionales, como RoboCup en su liga de robot de servicio para el hogar (Robocup@home <sup>[66]</sup>, <sup>[67]</sup>) y los torneos locales, como el mexicano de robótica, de la Federación Mexicana de Robótica <sup>[68]</sup>. Así, se impulsa la integración de tareas y de escenarios representativos en áreas de la salud con el fin de trasladar los desarrollos a los entornos reales y analizar la interacción de los sistemas con los usuarios.

El estudio e implementación de interfaces gráficas y naturales son básicas para crear canales de comunicación. De acuerdo al ciclo de vida del producto, es necesario evaluar los desarrollos en laboratorio y en el entorno final. Por tal motivo, es indispensable generar instrumentos de experimentación con tecnología de prototipado rápido y manufactura digital basada en procesos aditivos y de control numérico (CAD/CAM/CNC) asequibles actualmente en el entorno latinoamericano.

## IV. CONCLUSIONES

En este artículo se analizaron las características generales de diversos robots, y se exploraron algunos sistemas robóticos implementados en las áreas médicas en respuesta a la pandemia por COVID-19. Esta revisión sirve de base para argumentar sobre la implementación de esta tecnología emergente, apoyándose en los lineamientos del diseño de productos biomédicos y centrándose principalmente en criterios generales, como usuarios, usabilidad, manufactura, ciclo de vida del producto y lineamientos de seguridad para robots de uso personal. A modo prospectivo, se tomaron en cuenta los fenómenos sociales y tecnológicos que se apuntalan en un mundo posterior a la pandemia prevaleciente, con el fin de establecer las bases para la generación de sistemas capaces, eficientes y adecuados a los entornos de salud, considerando las nuevas formas de interacción.

La integración de sistemas robóticos en entornos cotidianos es sin duda un tema complejo. Resulta idóneo realizar análisis multidisciplinarios en donde tengan participación activa diferentes áreas de la ingeniería, como la mecánica, la electrónica y la computacional, entre otras, así como áreas de las humanidades y de la salud, en especial la psicología, la ergonomía, la antropología, la ética y, por último, el diseño de producto y el industrial. Dadas las condiciones sanitarias en la actualidad, es necesario establecer o reforzar los conocimientos útiles para el uso de robots a favor de la sociedad, prestando especial atención en los entornos médicos y considerando a los sistemas de esta índole como artefactos con cualidades similares a los equipos biomédicos. Es imperativo adecuar las instalaciones, creando la infraestructura necesaria para recibir robots en los espacios comunes, preparando los sistemas para monitorear el desempeño, colocando señalización de las áreas destinadas a la presencia de robots y designando espacios para el mantenimiento y el resguardo de los equipos.

El agente patógeno que causa la enfermedad por COVID-19 se ha establecido de manera permanente y, para mitigar su impacto, el desarrollo tecnológico actual está centrado en la creación de vacunas. A futuro, es necesario considerar otro tipo de desarrollos que eviten la propagación de este y de otros posibles virus. La robótica destaca por sus múltiples aportaciones en entornos sociales y esta se apoya a su vez en otras tecnologías, como el diseño de interfaces, la internet de las

cosas, la inteligencia artificial, la realidad virtual, la manufactura digital y el almacenamiento en la nube, entre otras. El desarrollo tecnológico local es probablemente el factor de mayor trascendencia ante los retos planteados, ya que la dependencia tecnológica es alta; por lo tanto, se debe impulsar el desarrollo considerando un modelo de innovación de triple hélice: academia, industria y gobierno.

Para finalizar, el desarrollo tecnológico emergente deberá adecuarse en su totalidad al uso de tecnologías de la industria 4.0, solucionando problemas sociales inmediatos, sin olvidar que las estrategias de integración dependen únicamente de personas capaces de entender las necesidades, quienes decidirán si su uso es pertinente o adecuado al contexto y si es acorde a las expectativas de la sociedad 5.0.

## REFERENCIAS

- [1] J. Bharatharaj, L. Huang, C. Krägeloh, M. R. Elara y A. Al-Jumaily, "Social engagement of children with autism spectrum disorder in interaction with a parrot-inspired therapeutic robot", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 133, pp. 368-376, 2018, doi: [10.1016/j.procs.2018.07.045](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.045).
- [2] M. Hii, P. Courtney y P. Royall, "An Evaluation of the Delivery of Medicines Using Drones", *Drones*, vol. 3, no. 3, jun. 2019, doi: [10.3390/drones3030052](https://doi.org/10.3390/drones3030052).
- [3] J. Bacik, F. Durovsky, M. Biroš, K. Kyslan, D. Perdukova y S. Padmanaban, "Pathfinder-Development of Automated Guided Vehicle for Hospital Logistics", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26892-26900, 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2767899](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767899).
- [4] C. G. Rodriguez-Gonzalez, A. Herranz-Alonso, V. Escudero-Vilaplana, M. A. Ais-Larisgoitia, I. Iglesias-Peinado y M. Sanjurjo-Saez, "Robotic dispensing improves patient safety, inventory management, and staff satisfaction in an outpatient hospital pharmacy", *J Eval Clin Pract*, vol. 25, no. 1, pp. 28-35, feb. 2019, doi: [10.1111/jep.13014](https://doi.org/10.1111/jep.13014).
- [5] T. Bányai, I. Maral, B. Illés, Á. Bányai y P. Tamás, "Optimization of Operation Strategy for Collection Systems of Biohazard Wastes in Hospitals Based on Autonomous Robots: A Heuristic Approach", *AJRCoS*, pp. 33-43, jun. 2020, doi: [10.9734/ajrcos/2020/v5i430142](https://doi.org/10.9734/ajrcos/2020/v5i430142).

- [6] L. A. Pineda, A. Rodríguez, G. Fuentes, C. Rascon y I. V. Meza, “Concept and Functional Structure of a Service Robot”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 2, feb. 2015, doi: 10.5772/60026.
- [7] J. Savage-Carmona, L. E. Sucar-Sucrar, L. A. Pineda-Cortés, M. Matamoros, D. A. Rosenblueth y M. Negrete, “Robots de Servicio”, en *Robótica de Servicio*, E. Sucar y Y. Hernández, eds. México: Academia Mexicana de Computación, A.C., 2017.
- [8] A. Ghaffari, I. McGill y A. Ardakani, “Trends in COVID-19 diagnostic test development”, *BioProcess Int.*, vol. 18, no. 6, pp. 34-45, 2020.
- [9] S. Manzoor et al., “Ontology-Based Knowledge Representation in Robotic Systems: A Survey Oriented toward Applications”, *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, may. 2021, doi: 10.3390/app11104324.
- [10] K. Severinson-Eklundh, A. Green y H. Hüttenrauch, “Social and collaborative aspects of interaction with a service robot”, *Rob Auton Syst*, vol. 42, no. 3-4, pp. 223-234, mar. 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00377-9.
- [11] G. Brewka, “Artificial intelligence—a modern approach by Stuart Russell and Peter Norvig, Prentice Hall. Series in Artificial Intelligence, Englewood Cliffs, NJ”, *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 11, no. 1, pp. 78-79, mar. 1996, doi: 10.1017/S0269888900007724.
- [12] I. H. Suh, G. H. Lim, W. Hwang, H. Suh, J. -H. Choi y Y. -T. Park, “Ontology-based multi-layered robot knowledge framework (OMRKF) for robot intelligence”, *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 429-436, doi: 10.1109/IROS.2007.4399082.
- [13] Z. Li, P. Moran, Q. Dong, R. J. Shaw y K. Hauser, “Development of a tele-nursing mobile manipulator for remote care-giving in quarantine areas”, *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 3581–3586, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989411.
- [14] “temi - The Personal Robot”. Robotemi.com. <https://www.robotemi.com/> (consultado sept. 2, 2021).
- [15] G. Yang et al., “Keep Healthcare Workers Safe: Application of Teleoperated Robot in Isolation Ward for COVID-19 Prevention and Control”, *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 33, no. 1, dic. 2020, doi: 10.1186/s10033-020-00464-0.
- [16] “Conoce a RoomieBot”. Roomiebot.io. <http://www.roomiebot.io/roomiebot/> (consultado sept. 23, 2021).
- [17] A. Luévano, “RoomieBot COVID-19”. Roomie-it.org. <https://roomie-it.org/robotics/book-illustration-series/> (consultado sept. 6, 2021).
- [18] H.-W. Huang et al., “Agile mobile robotic platform for contactless vital signs monitoring”, preprint, 2020. doi: 10.36227/techrxiv.12811982.v1.
- [19] “Anti Epidemic Solution”, UBTECH. <https://starwars.ubtrobot.com/products/anti-epidemic-solution?ls=en> (consultado sept. 2, 2021).
- [20] “Misty II: A Partner in COVID-19 Safety and Wellness”, MISTY ROBOTICS. <https://www.mistyrobotics.com/use-cases/robot-for-covid-19-coronavirus-safety-wellness/> (consultado sept. 2, 2021).
- [21] “Hospital 4.0: KUKA lab robots sort up to 3,000 blood samples per day”. KUKA. [https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2020/03/hospital-4-0\\_kuka-lab-robots-sort-blood-samples](https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2020/03/hospital-4-0_kuka-lab-robots-sort-blood-samples) (consultado sept. 2, 2021).
- [22] “ABB robots accelerate COVID-19 vaccine development in Thailand”. ABB. <https://new.abb.com/news/detail/72021/abb-robots-accelerate-covid-19-vaccine-development-in-thailand> (consultado sept. 2, 2021).
- [23] “The Cleveland Clinic’s Underground Robots Assist With Medical Waste”. Ideastream Public Media. <https://www.ideastream.org/news/the-cleveland-clinics-underground-robots-assist-with-medical-waste> (consultado sept. 2, 2021).
- [24] “Lifeline Robotics”, Lifeline Robotics. <https://www.lifelineroobotics.com> (consultado sept. 2, 2021).
- [25] C. Jinadatha, R. Quezada, T. W. Huber, J. B. Williams, J. E. Zeber y L. A. Copeland, “Evaluation of a pulsed-xenon ultraviolet room disinfection device for impact on contamination levels of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*”, *BMC Infect Dis*, vol. 14, no. 1, 2014, doi: 10.1186/1471-2334-14-187.

- [26] “UVD - Case”. UVO ROBOTS. <http://uvd.blue-ocean-robotics.com/italy> (consultado sept. 23, 2021).
- [27] “Akara Robotics Turns TurtleBot Into Autonomous UV Disinfecting Robot”. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/akara-robotics-turtlebot-autonomous-uv-disinfecting-robot> (consultado sept. 2, 2021).
- [28] “CSAIL robot disinfects Greater Boston Food Bank”. MIT News On Campus and Around the World. <https://news.mit.edu/2020/csail-robot-disinfects-greater-boston-food-bank-covid-19-0629> (consultado sept. 23, 2021).
- [29] “Geek+ launches two new disinfection robots”. Geek+. <https://blog.geekplus.com/company/news-center/geek-launches-two-new-disinfection-robots> (consultado sept. 2, 2021).
- [30] “Aobo Information Technology Co., Ltd.-Professional production of service robots”. AoBoTechnology. <http://www.aoborobot.com/en/robot-fig-en/penwubanxiaodubenben-fig.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [31] “Spray disinfection robot\_Shenzhen all intelligent robot technology Co., Ltd”. Altech.com. <http://www.ai-aitech.com/Sterilization-robot> (consultado sept. 2, 2021).
- [32] “Keenon Disinfection Robot M2-Keenon Robotics”. KEENON. <https://www.keenonrobot.com/EN/Product/pro3.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [33] T. Fong, I. Nourbakhsh y K. Dautenhahn, “A survey of socially interactive robots”, *Rob Auton Syst*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143-166, mar. 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00372-X.
- [34] A. Henschel, R. Hortensius y E. S. Cross, “Social Cognition in the Age of Human-Robot Interaction”, *Trends Neurosci.*, vol. 43, no. 6, pp. 373-384, jun. 2020, doi: 10.1016/j.tins.2020.03.013.
- [35] D. Feil-Seifer, K. S. Haring, S. Rossi, A. R. Wagner y T. Williams, “Where to Next? The Impact of COVID-19 on Human-Robot Interaction Research”, *J. Hum.-Robot Interact.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, feb. 2021, doi: 10.1145/3405450.
- [36] “COVID-19 Archives”, PAL Robotics Blog. <https://blog.pal-robotics.com/tag/covid-19/> (consultado sept. 23, 2021).
- [37] palrobot, “ARI - PAL Robotics: Leading service robotics”, PAL Robotics. <https://pal-robotics.com/robots/ari/> (consultado sept. 23, 2021).
- [38] “UN sends five robots to Rwanda to detect coronavirus”, Robotics & Automation News, jun. 12, 2020. <https://roboticsandautomationnews.com/2020/06/12/un-sends-five-robots-to-rwanda-to-detect-coronavirus/33036/> (consultado sept. 2, 2021).
- [39] “Moxi”, Diligent Robotics. <https://www.diligentrobots.com/moxi> (consultado sept. 2, 2021).
- [40] P. H. King R. C. Fries y A. T. Johnson, *Design of Biomedical Devices and Systems*, 4.<sup>a</sup> ed. Boca Ratón: Taylor & Francis, 2018, doi: 10.1201/9780429434792.
- [41] ISO, “ISO 9241-11:2018”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/35/63500.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [42] D. van Eijk, J. van Kuijk, F. Hoolhorst, C. Kim, C. Harke y S. Dorrestijn, “Design for Usability; practice-oriented research for user-centered product design”, *Work*, vol. 41, no. supl. 1, pp. 1008-1015, 2012, doi: 10.3233/WOR-2012-1010-1008.
- [43] M. Orshansky, S. R. Nassif y D. S. Boning, *Design for manufacturability and statistical design: a comprehensive approach*. Nueva York - Londres: Springer, 2007.
- [44] L. W. McKeen, “Plastics Used in Medical Devices”, en *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*, K. Modjarrad y S. Ebnesajjad, eds., Elsevier, 2014, pp. 21-53, doi: 10.1016/B978-0-323-22805-3.00003-7.
- [45] C. S. Frandsen, M. M. Nielsen, A. Chaudhuri, J. Jayaram y K. Govindan, “In search for classification and selection of spare parts suitable for additive manufacturing: a literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 4, pp. 970-996, feb. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1605226.
- [46] C. M. González-Henríquez, M. A. Sarabia-Vallejos y J. Rodríguez-Hernández, “Polymers for additive

- manufacturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications”, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 94, pp. 57-116, jul. 2019, doi: [10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001](https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001).
- [47] E. Livingston, A. Desai y M. Berkwitz, “Sourcing Personal Protective Equipment During the COVID-19 Pandemic”, *JAMA*, vol. 323, no. 19, 2020, doi: [10.1001/jama.2020.5317](https://doi.org/10.1001/jama.2020.5317).
- [48] P. Wady et al., “Effect of ionising radiation on the mechanical and structural properties of 3D printed plastics”, *Addit Manuf*, vol. 31, 2020, doi: [10.1016/j.addma.2019.100907](https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100907).
- [49] T. A. M. Valente, D. M. Silva, P. S. Gomes, M. H. Fernandes, J. D. Santos y V. Sencadas, “Effect of Sterilization Methods on Electrospun Poly(lactic acid) (PLA) Fiber Alignment for Biomedical Applications”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 5, pp. 3241-3249, feb. 2016, doi: [10.1021/acsami.5b10869](https://doi.org/10.1021/acsami.5b10869).
- [50] J. L. Cadnum, D. Li, S. N. Redmond, A. R. John, B. Pearlmutter y C. Donskey, “Effectiveness of Ultraviolet-C Light and a High-Level Disinfection Cabinet for Decontamination of N95 Respirators”, *Pathog. Immun.*, vol. 5, no. 1, 2020, doi: [10.20411/pai.v5i1.372](https://doi.org/10.20411/pai.v5i1.372).
- [51] J. Ma, G. E. O. Kremer y C. D. Ray, “A comprehensive end-of-life strategy decision making approach to handle uncertainty in the product design stage”, *Res Eng Design*, vol. 29, no. 3, pp. 469-487, jul. 2018, doi: [10.1007/s00163-017-0277-0](https://doi.org/10.1007/s00163-017-0277-0).
- [52] M. Wächter, H. Hoffmann y A. C. Bullinger, “Towards an Engineering Process to Design Usable Tangible Human-Machine Interfaces”, en *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, vol. 825, 2019, pp. 136-147, doi: [10.1007/978-3-319-96068-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5_15).
- [53] M. E. Wiklund y S. B. Wilcox, *Designing usability into medical products*. Boca Ratón: CRC Press, 2005.
- [54] ISO, “ISO 10993-1:2018”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/89/68936.html> (consultado sept. 23, 2021).
- [55] ISO, “ISO 13482:2014”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/38/53820.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [56] M. E. Reyes, I. V. Meza y L. A. Pineda, “Robotics facial expression of anger in collaborative human-robot interaction”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 16, no. 1, 2019, doi: [10.1177/1729881418817972](https://doi.org/10.1177/1729881418817972).
- [57] M. A. Goodrich y A. C. Schultz, “Human-Robot Interaction: A Survey”, *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.*, vol. 1, no. 3, pp. 203-275, 2007, doi: [10.1561/1100000005](https://doi.org/10.1561/1100000005).
- [58] T. Nomura, T. Suzuki, T. Kanda y K. Kato, “Measurement of negative attitudes toward robots”, *Interact. Stud.*, vol. 7, no. 3, pp. 437-454, nov. 2006, doi: [10.1075/is.7.3.14nom](https://doi.org/10.1075/is.7.3.14nom).
- [59] M. Mori, K. MacDorman y N. Kageki, “The Uncanny Valley [From the Field]”, en *IEEE Robot. Automat. Mag.*, vol. 19, no. 2, pp. 98-100, jun. 2012, doi: [10.1109/MRA.2012.2192811](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811).
- [60] R. Florida, A. Rodríguez-Pose y M. Storper, “Cities in a post-COVID world”, *Urban Stud*, jun. 2021, doi: [10.1177/00420980211018072](https://doi.org/10.1177/00420980211018072).
- [61] S. Sharfuddin, “The world after Covid-19”, *The Round Table*, vol. 109, no. 3, pp. 247-257, may. 2020, doi: [10.1080/00358533.2020.1760498](https://doi.org/10.1080/00358533.2020.1760498).
- [62] M. S. Kaiser, S. Al Mamun, M. Mahmud y M. H. Tania, “Healthcare Robots to Combat COVID-19”, en *COVID-19: Prediction, Decision-Making, and its Impacts*, K. C. Santosh y A. Joshi, eds., Singapur: Springer Singapur, 2021, vol. 60, pp. 83-97, doi: [10.1007/978-981-15-9682-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9682-7_10).
- [63] J. M. Abadal, J. Gonzalez-Nieto, F. Lopez-Zarraga, M. A. de Gregorio, P. M. Kitrou y S. Mendez, “Future scenarios and opportunities for interventional radiology in the post COVID-19 era”, *Diagn Interv Radiol*, vol. 27, no. 2, pp. 263-268, mar. 2021, doi: [10.5152/dir.2020.20494](https://doi.org/10.5152/dir.2020.20494).
- [64] G. N. Moawad, S. Rahman, M. A. Martino y J. S. Klebanoff, “Robotic surgery during the COVID pandemic: why now and why for the future”, *J Robot Surg*, vol. 14, no. 6, pp. 917-920, dic. 2020, doi: [10.1007/s11701-020-01120-4](https://doi.org/10.1007/s11701-020-01120-4).
- [65] I. Tzinis, “Technology Readiness Level”. NASA.gov. <http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineer->

ing/technology/technology\_readiness\_level (consultado sept. 27, 2021).

[66] “RoboCup”. RoboCup.org. <https://www.robocup.org/> (consultado sept. 27, 2021).

[67] “RoboCup@Home. Where the best domestic service robots test themselves”. <https://athome.robocup.org/> (consultado sept. 27, 2021).

[68] “Federación Mexicana de Robótica”. <https://femexrobotica.org/> (consultado sept. 27, 2021).

# Amortiguadores regenerativos para sistemas de suspensión automotriz: Una revisión

## *Regenerative shock absorbers for automotive suspension systems: A review*

Dr. Eduardo Barredo-Hernández<sup>1</sup>✉, Dr. José Gabriel Mendoza-Larios<sup>1</sup>, M. C. Irving Abdiel Maldonado-Bravo<sup>2</sup>, Dr. Jan Mayén-Chaires<sup>3</sup>, M. C. Cuauhtémoc Mazón-Valadez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz, C. P. 69000, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Int. Palmira s/n, col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, C. P. 62490, México.

<sup>3</sup> Centro de Investigación y Asistencia Técnica/ CIATEQ A. C. Eje 126 No. 225, Zona Industrial, San Luis Potosí, S.L.P., C. P. 78395, México.

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una revisión exhaustiva de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos utilizados para mejorar la reducción del consumo de combustible y de las emisiones contaminantes (principalmente el CO<sub>2</sub>) en vehículos comerciales. En primera instancia, se describe la interacción entre el tren motriz y el sistema de suspensión automotriz, incluyendo los ciclos de velocidad de conducción como el enlace principal. Posteriormente, se presenta un esquema gráfico del proceso de regeneración de energía vibratoria mediante amortiguadores regenerativos, considerando el sistema de almacenamiento de energía. Además, se discuten los avances tecnológicos recientes de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos, sopesando principalmente la filosofía de diseño del mecanismo de rectificación de energía vibratoria. Finalmente, se presentan las conclusiones y tendencias futuras sobre las aplicaciones de estos dispositivos en diferentes disciplinas de la ingeniería.

**PALABRAS CLAVE:** vehículo; amortiguadores regenerativos; energía vibratoria; sistemas de suspensión automotriz; energías verdes.

### ABSTRACT

This paper presents an exhaustive review for different kinds of regenerative shock absorbers used to improve the reduction of fuel consumption and polluting emissions (e.g., CO<sub>2</sub>) in commercial vehicles. In the first instance, the interaction between the powertrain and the automotive suspension system is described including the driving velocity cycles as the main link. Then, a graphic scheme of the vibratory energy regeneration process is presented using regenerative shock absorbers and including the energy storage system. In addition, recent technological advances of different kinds of regenerative shock absorbers are discussed considering the design philosophy for the vibratory energy rectification mechanism. Finally, the conclusions and future trends on the potential applications of these devices in different engineering disciplines are presented.

**KEYWORDS:** vehicle; regenerative shock absorbers; vibration energy; automotive suspension systems; green energy.

#### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Eduardo Barredo-Hernández

**INSTITUCIÓN:** Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM)

**DIRECCIÓN:** Carretera Huajuapán-Acatlilma, km 2.5, Huajuapán de León, Oaxaca, México, C. P. 69000.

**CORREO ELECTRÓNICO:** eduardin@mixteco.utm.mx

**Fecha de recepción:** 24 de enero de 2022. **Fecha de aceptación:** 22 de marzo de 2022. **Fecha de publicación:** 4 de abril de 2022.



## I. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías emergentes de regeneración de energía en el sector automotriz han sido estudiadas y mejoradas a medida que los problemas energéticos se vuelven cada vez más urgentes. Tales tecnologías son las siguientes: sistema de recuperación de energía cinética (KERS, por sus siglas en inglés) [1]-[3], sistema de regeneración energía térmica desperdiciada en el motor [4] y los sistemas de suspensiones regenerativas automotrices [5].

En la mayoría de los vehículos convencionales que utilizan combustible fósil, se ha demostrado que solo el 16 % de la energía química del combustible se utiliza

para propulsar el vehículo [6]. Parte de la energía restante alimenta a otros subsistemas del vehículo y, además, la mayor parte de la energía térmica producida por la máquina de combustión interna se disipa en forma de calor. El porcentaje restante de energía que desplaza al vehículo se distribuye para vencer los efectos aerodinámicos (4 %), resistencia a la rodadura (4 %) y en el sistema de frenado (4 %) (Figura 1).

La resistencia a la rodadura se genera principalmente por el espectro estocástico de potencia del nivel de rugosidad de la carretera, el cual induce energía de vibración al vehículo. La energía vibratoria se transmite al sistema de suspensión y, posteriormente, se disipa en forma de calor en el amortiguador de fluido viscoso [7].

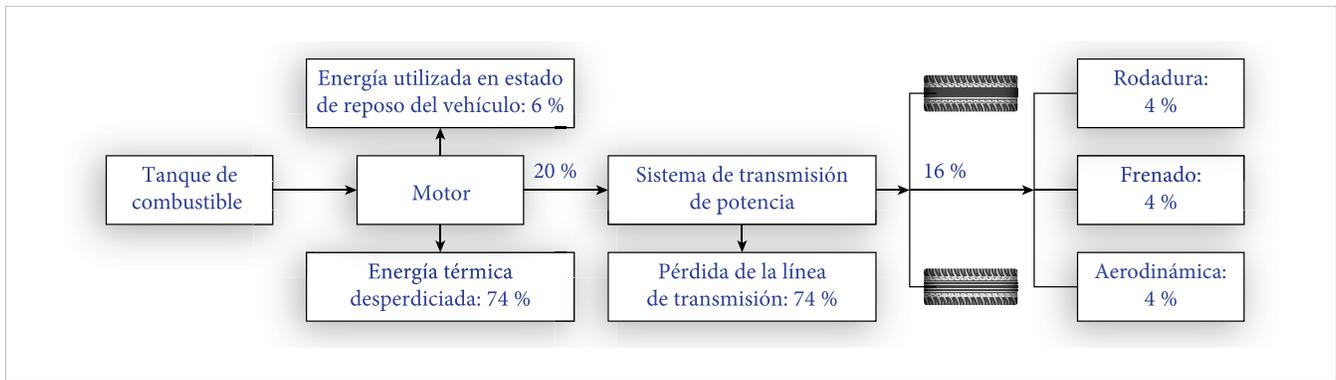


Figura 1. Diagrama del flujo de energía producida por el combustible fósil de un vehículo de pasajeros [6].

Pareciera que no existe una interacción entre el tren motriz del vehículo con el sistema de suspensión y, de hecho, esto es correcto hasta cierto punto. Es claro que el tren motriz cubre las demandas de requerimiento de potencia según sea el modo de conducción del vehículo, mientras que la función principal del sistema de suspensión automotriz es mitigar la vibración generada por el perfil irregular de la carretera y por los movimientos no sincronizados del chasis. Sin embargo, los modos de conducción influyen directamente en la dinámica del vehículo, lo que permite un vínculo entre el tren motriz y el sistema de suspensión (Figura 2).

En la Figura 2 se describe la interacción subyacente entre el tren motriz y la suspensión regenerativa de un Vehículo Eléctrico Híbrido (HEV), en la cual la velocidad de conducción del vehículo influye en ambos sistemas dinámicos. De hecho, la ecuación diferencial estocástica (1) involucra los ciclos de velocidad de conducción  $V(t)$ , generando las señales vibratorias de la

carretera como fuente de excitación al sistema de suspensión del vehículo:

$$\dot{x}_g(t) = -2\pi f_0 x_g(t) + 2\pi n_0 W(t) \sqrt{G_x(\eta_0) V(t)} \quad (1)$$

donde  $f_0 = 0.0628$  Hz representa la frecuencia de corte,  $\eta_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$  es la frecuencia espacial de referencia,  $G_x(\eta_0)$  es el coeficiente de rugosidad de la carretera especificado por la norma ISO 8608 [9],  $V(t)$  es la velocidad de conducción del vehículo,  $W(t)$  es un proceso estocástico estacionario (ruido blanco gaussiano) con media temporal igual a cero y finalmente,  $x_g(t)$  es el perfil irregular de la carretera [10]. A partir de la Ecuación (1), es claro observar que los niveles de intensidad de vibración en el vehículo dependen fuertemente de la rugosidad de la carretera  $G_x(\eta_0)$  y de la velocidad de conducción del vehículo  $V(t)$ . En efecto, el rendimiento del combustible es también afectado por la vibración inducida por el perfil irregular de la carretera, tal como se describe en la Figura 2.

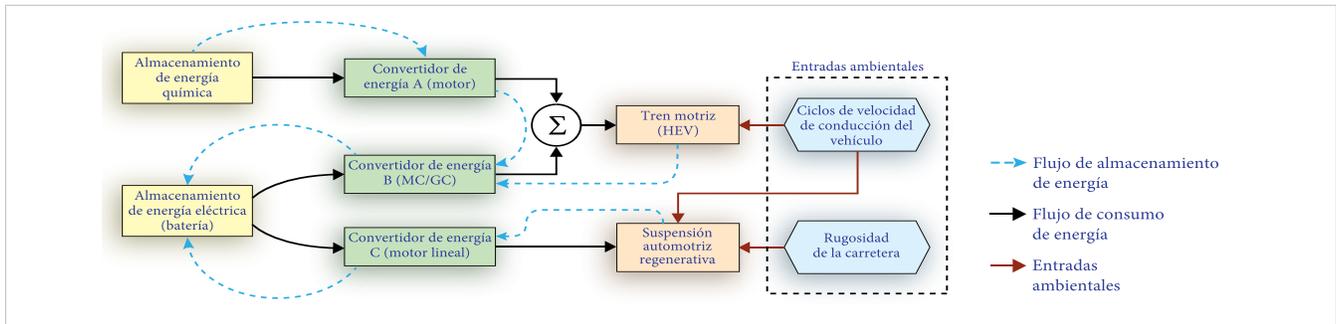


Figura 2. Flujo de energía en el tren motriz híbrido interactuando con una suspensión regenerativa automotriz [8].

## II. PROCESO DE REGENERACIÓN DE ENERGÍA VIBRATORIA

Una cantidad considerable de energía cinética se disipa en forma de calor en los amortiguadores de fluido viscoso que conforman a las suspensiones automotrices pasivas. Esta energía cinética causada por la velocidad relativa del sistema de suspensión se podría regenerar por medio de amortiguadores regenerativos inteligentes para reutilizarla posteriormente en otros subsistemas del vehículo.

En la Figura 3 se presenta un esquema general de la recolección de energía en una suspensión regenerativa,

basado en el trabajo de Zhang *et al.* [11]. Nótese que solo la energía cinética producida por la velocidad relativa del sistema de suspensión se considera para la regeneración. Aunque los neumáticos también disipan energía, la esparcida por el sistema de suspensión es aún mayor. Con el objetivo de transformar el movimiento vertical oscilatorio a movimiento rotacional unidireccional, dos embragues unidireccionales acoplan y desacoplan a los vástagos del amortiguador regenerativo. El movimiento rotacional rectificado acciona un generador eléctrico para producir energía que posteriormente se almacena en supercapacitores. Al final, esta energía se puede utilizar para abastecer los requerimientos de potencia eléctrica del tren motriz del vehículo.

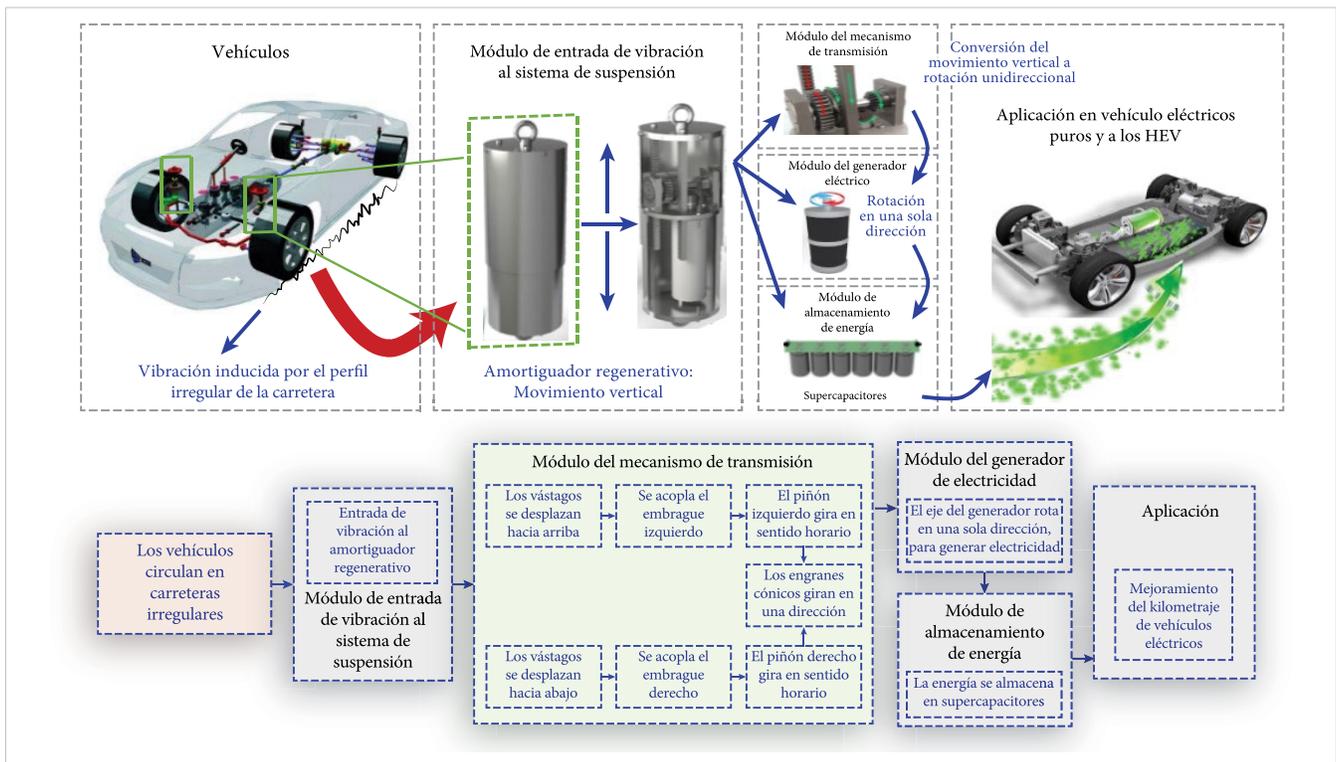


Figura 3. Diagrama de flujo de energía vibratoria en una suspensión con amortiguador regenerativo [11].

Para lograr una densidad alta de conversión de energía, diferentes tipos de amortiguadores regenerativos han sido diseñados, manufacturados y analizados tanto teóricamente como experimentalmente. Estos tipos de cosechadores de energía cinética se clasifican de acuerdo a la forma en como convierten la energía de vibración a electricidad. Se conocen tres tipos de amortiguadores regenerativos, que son los siguientes: el electromagnético lineal, el electromecánico basado en transmisión mecánica y el electrohidráulico basado en transmisión hidráulica. Aunque estos pueden regenerar la energía de vibración, algunos inconvenientes se presentan principalmente en el proceso de rectificación de movimiento vertical bidireccional del sistema de suspensión a movimiento rotacional unidireccional del generador eléctrico.

### III. AMORTIGUADORES REGENERATIVOS

A continuación se describe detalladamente tanto la filosofía de diseño como el funcionamiento de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos reportados en la literatura. También se abordan las diferentes aplicaciones en energías verdes de estos dispositivos.

#### 3.1. Amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales

Los amortiguadores electromagnéticos lineales transforman directamente la energía cinética producida por

la diferencia de velocidades del sistema de suspensión, a través del fenómeno de inducción electromagnética (Figura 4). Además, este dispositivo genera una densidad baja de regeneración de energía porque no presenta un mecanismo de amplificación de movimiento. Sin embargo, ofrece una eficiencia alta de conversión de energía. En efecto, la variación del flujo magnético producido por el movimiento relativo entre los imanes y las bobinas del amortiguador origina un voltaje inducido y, consecuentemente, energía eléctrica.

Debido a la efectividad tanto de conversión de energía como de acción de control de este tipo de dispositivo, se han realizado recientemente varios estudios enfocados al incremento del rendimiento de las suspensiones activa y semiactivas autoalimentadas. El primer amortiguador regenerativo basado en motores electromagnéticos lineales fue presentado en el trabajo de Karnopp [12]. Más tarde, Suda y Shiiba [13] desarrollaron una suspensión híbrida compuesta de un sistema de recolección de energía (amortiguador regenerativo electromagnético lineal) para mejorar el rendimiento dinámico de una suspensión activa y así reducir el consumo energía del sistema de control. Además, Zuo et al. [14] diseñaron un amortiguador regenerativo compuesto de un generador lineal de cuatro fases para aumentar la eficiencia de regeneración de energía, obteniendo una capacidad de recolección de energía que va desde 26 hasta 64 watts de potencia eléctrica, considerando que la velocidad relativa de la suspensión es de 0.25-0.5 m/s.

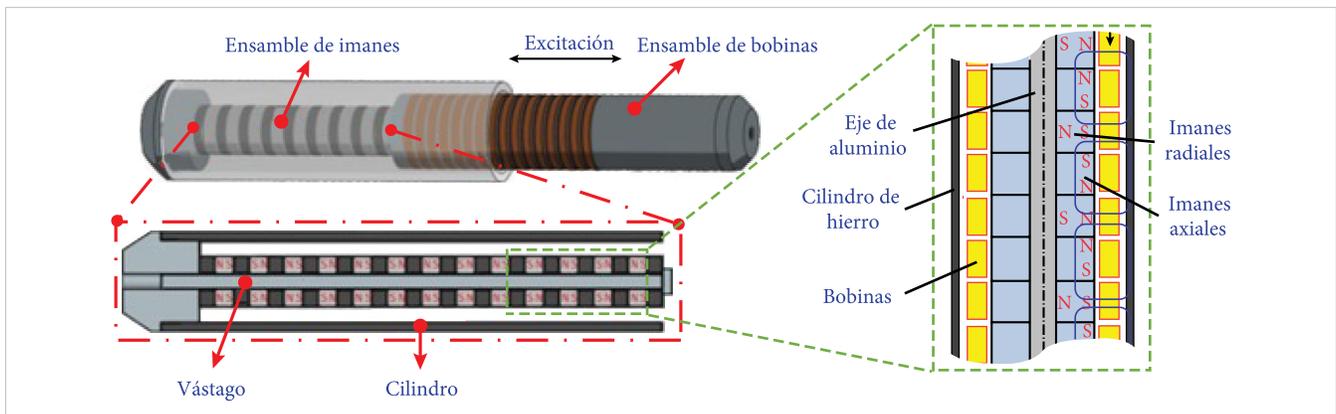


Figura 4. Recolector electromagnético lineal de cuatro fases (imagen adaptada y reproducida con el permiso correspondiente [5]).

Más tarde, Gysen et al. [15] analizaron y fabricaron una suspensión activa compuesta principalmente de un amortiguador regenerativo electromagnético lineal y concluyeron que tal suspensión puede mejorar significativamente tanto la comodidad como la seguridad

de conducción del vehículo, manteniendo un consumo mínimo de energía dentro del rango de 150-300 watts. Con esto en mente, Ebrahimi et al. [16] diseñaron un amortiguador electromagnético híbrido que consumía menor cantidad de energía que una suspensión activa,

y aprovechaba el efecto de corriente de Foucault para producir amortiguamiento eléctrico pasivo. Además, el dispositivo redujo hasta el 70 % del consumo energético de una suspensión activa convencional, sin embargo, el peso del dispositivo era relativamente mayor que el de los amortiguadores convencionales, lo cual es una desventaja en aplicaciones reales.

Por su parte, Asadi *et al.* [17] diseñaron un amortiguador regenerativo híbrido que consta de dos partes: una pasiva que proporciona fuerzas de amortiguamiento pasivo por medio de un fluido viscoso y otra electromagnética, la cual se utilizó para la regeneración de energía vibratoria por medio de un generador electromagnético lineal y también para proporcionar fuerzas activas al sistema de suspensión. Hu *et al.* [18] diseñaron teóricamente un amortiguador regenerativo semiactivo autoalimentado, el cual consiste de dos partes también: un generador eléctrico lineal que cosecha la energía cinética del sistema de suspensión y el fluido magnetorreológico que controla los niveles de amortiguamiento a través de la corriente eléctrica producida por el generador. Chen *et al.* [19] diseñaron un amortiguador regenerativo semiactivo híbrido con tres niveles de amortiguamiento regulables, constituido principalmente de un generador lineal y un amortiguador hidráulico.

Recientemente, se reportaron en [20]-[22] varios estudios sobre suspensiones semiactivas autoalimentadas con amortiguadores electromagnéticos lineales. Por

otra parte, Gao *et al.* [23] estudiaron los compromisos dinámicos entre el índice de la comodidad de conducción y el de la regeneración de energía en suspensiones electromagnéticas activas por medio de diferentes estrategias de control, y demostraron que no es posible incrementar la capacidad de regeneración de energía sin afectar el índice de la comodidad. Recientemente, Ding *et al.* [24] desarrollaron un sistema de suspensión activa electromagnética híbrida, compuesta principalmente de un motor lineal y un amortiguador de fluido magnetorreológico. Los resultados indicaron que el sistema híbrido minimizó el consumo energético de las suspensiones electromagnéticas activas.

Con el objetivo de disminuir el tamaño y peso de los amortiguadores electromagnéticos lineales, Duong *et al.* [25] diseñaron y fabricaron un recolector electromagnético monofásico lineal de 8 fases y 8 ranuras con imanes permanentes (Figura 5), y demostraron también que tal dispositivo recolectó una potencia promedio de 96.67 watts. Sin embargo, el mecanismo presentó efectos negativos en las dinámicas del sistema de suspensión. Es evidente que los amortiguadores electromagnéticos lineales proporcionan un mejoramiento significativo tanto en las suspensiones activas como en las semiactivas, sin embargo, el tamaño y peso de estos es el principal inconveniente para su aplicación en sistemas reales, ya que se necesita aumentar el tamaño de los motores electromagnéticos para proporcionar fuerzas grandes de amortiguamiento [5], [26], [27].

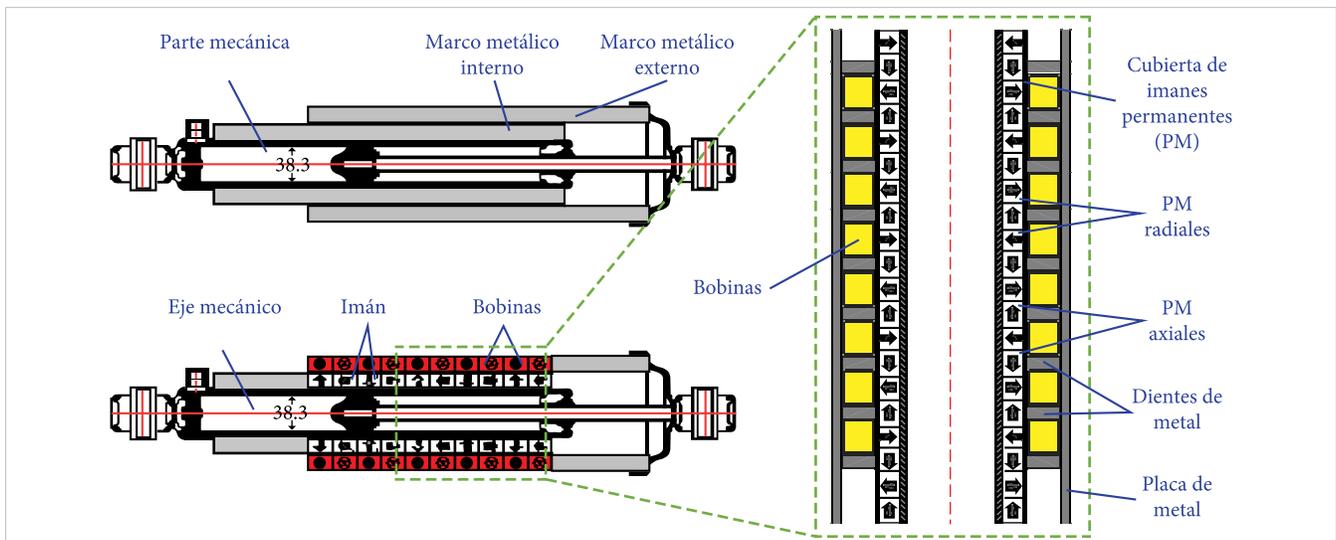


Figura 5. Recolector electromagnético lineal de ocho polos (imagen adaptada y reproducida con el permiso correspondiente [25]).

Recientemente, Lafarge *et al.* [28] diseñaron un amortiguador regenerativo electromagnético lineal (LEH,

por sus siglas en inglés) embebido directamente en el sistema de suspensión. A través del método de diseño

robusto basado en el modelo de Bond Graph Global, el LEH entregó 10 watts, considerando que la velocidad relativa del sistema de suspensión es de 1 m/s, con una eficiencia electromecánica de aproximadamente 29 %. Similarmente, Zhou *et al.* [29] propusieron una suspensión de recolección de energía magnética (MEHS, por sus siglas en inglés) basada en la topología de diseño de los generadores electromagnéticos lineales, demostrando que el MEHS logra regenerar eficazmente la energía vibratoria aleatoria.

En vista del potencial de conversión de energía de los amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales, estos han sido instalados en las entradas y salidas de los túneles de carretera con el objetivo de aprovechar la energía de impacto de los neumáticos del vehículo y así abastecer los requerimientos de energía eléctrica para el alumbrado de los túneles. De hecho, esta tecnología prometedora es útil en lugares donde el acceso a energía eléctrica es difícil. Además, Zhang *et al.* [30] desarrollaron un sistema de recolección de energía cinética de alto voltaje para aplicarlo en los túneles de carretera sustentables, que fue capaz de recolectar un voltaje pico de 194 voltios y un voltaje promedio de 55.2 voltios cuando el vehículo excitaba al dispositivo a una velocidad de 40 km/h.

Muchos investigadores han diseñado recolectores electromagnéticos lineales a partir de diferentes tipos de fuentes de vibración, los cuales aprovechan el fenómeno de levitación magnética para producir electricidad a baja escala [31]–[35]. Algunas aplicaciones de estos dispositivos se encuentran en la regeneración de energía a partir de la energía vibratoria causada por sismos [36], en sistemas de suspensión de vehículos [37], en túneles de viento actuando como sensores autoalimentados [38], en sensores de vibración autoalimentados [39], etc. Adicionalmente, Xiang Zou *et al.* [7], [32] reportaron los principios, métodos y aplicaciones de diferentes tipos de transductores de densidad baja en el aprovechamiento de energía cinética, y además informaron que estos dispositivos son más factibles de utilizar en aplicaciones tales como aeroespaciales, ingeniería biomédica, monitoreo ambiental e ingeniería militar.

### 3.2. Amortiguadores regenerativos electromecánicos

Los amortiguadores regenerativos electromecánicos se distinguen básicamente por su mecanismo de conversión de movimiento. Los elementos mecánicos del me-

canismo transforman el movimiento vertical bidireccional del sistema de suspensión en movimiento rotacional unidireccional y, posteriormente, accionan un generador eléctrico [40]. Además, estos pueden amplificar la energía cinética por medio de un tren de potencia, y así obtener una densidad alta de regeneración de energía.

Existen diferentes tipos de mecanismos de amplificación de movimiento, algunos de los cuales son los siguientes: tornillo-bola (*ball-screw mechanism*), piñón-cremallera (*rack-pinion mechanism*), tornillo algebraico (*algebraic screw mechanism*), sistema de transmisión basado en engranajes helicoidales (*helical gears transmission*), etc. Inicialmente, Kawamoto *et al.* [41] desarrollaron el primer amortiguador regenerativo basado en el mecanismo tornillo-bola para un sistema de suspensión activa (Figura 6 a). Más tarde, Amati *et al.* [42] estudiaron la factibilidad de utilizar este tipo de mecanismo en suspensiones semiactivas y totalmente activas, y demostraron que la dinámica del sistema de suspensión se deteriora a frecuencias altas de excitación debido al efecto de la constante de inercia (masa equivalente). De hecho, este efecto dinámico es una característica intrínseca del inersor (*inertor*) [43]. Este inconveniente se puede resolver añadiendo elementos de restitución de energía mecánica que proporcionan al sistema un mejor ancho de banda de filtrado de frecuencias [44], [45].

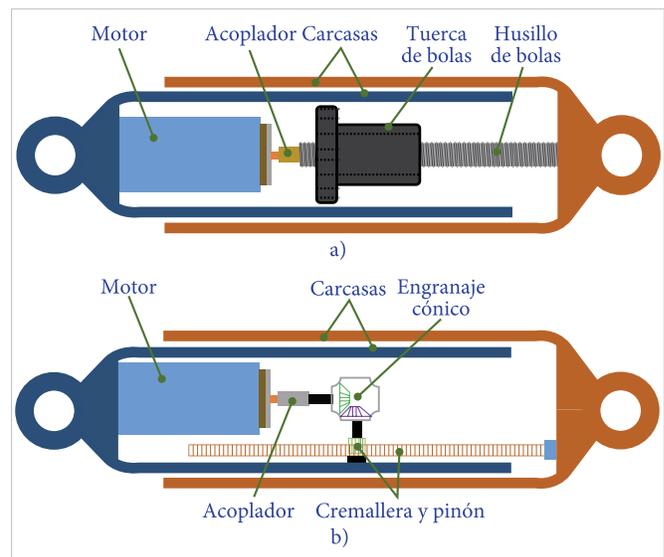


Figura 6. Amortiguadores regenerativos basados en transmisión mecánica: a) transmisión piñón-cremallera y b) transmisión tornillo-bola [46].

Para mejorar tanto el índice de la comodidad como el índice de regeneración de energía de los amorti-

guadores electromagnéticos basados en el mecanismo tornillo-bola, Zhang *et al.* [47] desarrollaron el control robusto  $\mathcal{H}_\infty$  con múltiples requerimientos dinámicos considerando el modelo completo del vehículo. Aunque en esa investigación se reveló que el controlador proporcionó excelentes resultados a bajas frecuencias de excitación (1-4 Hz) para ambos requerimientos dinámicos, no se estudió el índice de la seguridad de conducción (*road handling performance index*) que es de suma importancia a frecuencias altas de excitación. Este inconveniente fue estudiado más tarde por Pires *et al.* [48]: considerando el modelo de una cuarta parte del vehículo, ellos demostraron que cuando el valor de inercia del amortiguador regenerativo es de 50 kg, tanto el índice de la comodidad como el de la seguridad de conducción se degradan drásticamente en un 84 % y 61 %, respectivamente. Sin embargo, cuando la inercia es menor o igual a 20 kg, se mejoran sustancialmente ambos índices de rendimiento. Esto implica que no siempre se pueden lograr simultáneamente tales índices de rendimiento dinámico y obteniendo niveles altos de regeneración de energía en la suspensión regenerativa. De hecho, también este fenómeno dinámico producido ya sea por el mecanismo tornillo-bola o por el mecanismo piñón-cremallera fue estudiado por Yin *et al.* [49].

En términos de la potencia regenerada promedio producida por el amortiguador regenerativo basado en la

transmisión tornillo-bola, Huang *et al.* [50] demostraron que es posible cosechar una potencia promedio de aproximadamente 9 watts, mejorando significativamente tanto los índices de rendimiento dinámico como la capacidad de regeneración de energía del sistema de suspensión de un solo grado de libertad. Adicionalmente, Li *et al.* [51], [52] incrementaron la eficiencia de los regeneradores de energía basados en el mecanismo de tornillo-bola mediante el uso de un generador síncrono de imanes permanentes (PMSM) de densidad alta de recolección de energía y un convertidor *buck-boost* para controlar los estados de carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía. Además, este dispositivo logró simultáneamente fuerzas de amortiguamiento controlables y una eficiencia de regeneración de energía del 51.81 % - 75.24 %, considerando excitaciones armónicas y estocásticas.

Vale la pena mencionar también que Xie *et al.* [53], [54] diseñaron un amortiguador regenerativo electromecánico que consiste de una transmisión de múltiples mecanismos de tornillo-bola y de varios generadores eléctricos para aumentar el potencial de regeneración de energía (Figura 7). El dispositivo recolectó 32 watts de potencia eléctrica promedio cuando la frecuencia y el desplazamiento de excitación es de 3 Hz y 20 mm, respectivamente.

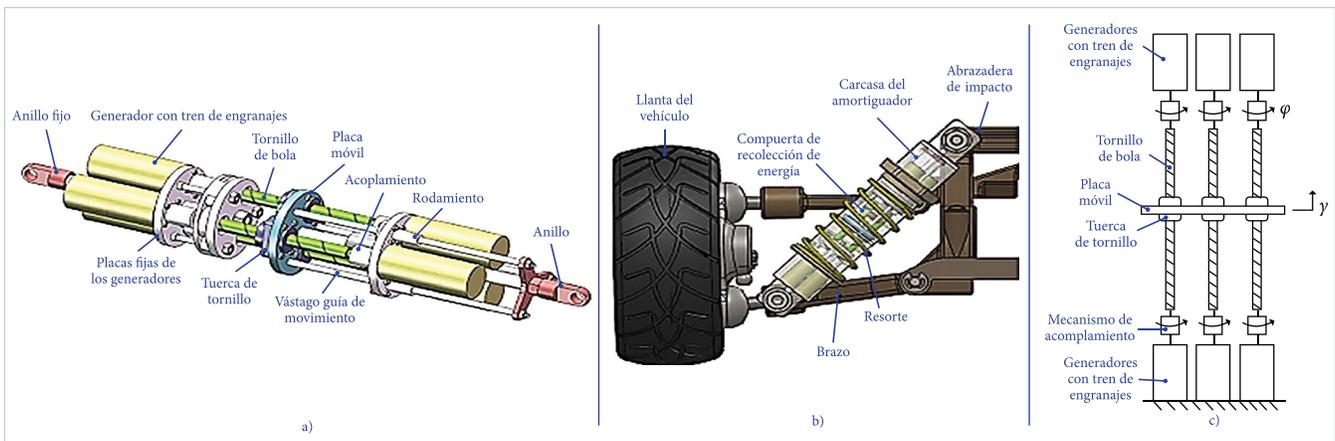


Figura 7. Diagrama del amortiguador electromecánico de recolección de energía basado en múltiples mecanismos de tornillo-bola y generadores eléctricos controlados: a) modelo 3D, b) el amortiguador regenerativo en el sistema de suspensión automotriz y c) diagrama del mecanismo de transmisión de potencia mecánica [53].

Recientemente, un novedoso amortiguador electromecánico con múltiples mecanismos de tornillo-bola fue diseñado por Wang *et al.* [55] (Figura 8). El dispositivo cosechó una potencia promedio de 3.701 watts, con una

eficiencia promedio de 36.4 % bajo el efecto de excitación armónica. Por otra parte, Bai *et al.* [56] propusieron un novedoso amortiguador regenerativo autoalimentado con la capacidad de regeneración de energía y de pro-

porcionar fuerzas de amortiguamiento por medio de un fluido magnetorreológico (Figura 9). Este dispositivo ofreció una capacidad de fuerza de amortiguamiento de 341-2260 newtons, considerando un rango de corriente eléctrica de 0-1 amperio. Además, la potencia promedio de salida del dispositivo fue de 4.5 watts cuando la velocidad de excitación fue de 125 mm/s. Finalmente, Yang *et al.* [57] diseñaron un recolector de energía cinética producida por los movimientos verticales en una bicicleta, cuyo dispositivo consistía básicamente de un mecanismo tornillo-bola, un rectificador de movimiento (embragues unidireccionales) y un sistema de almacenamiento de energía eléctrica basado en supercapacitores. Además, se observó que la potencia de salida del recolector es proporcional a la frecuencia de excitación e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica externa. Este tipo de amortiguador regenerativo logró recolectar un voltaje máximo de salida de 7.8 voltios y una potencia máxima de 0.491 watts, con una eficiencia de conversión total de 52.8 % considerando excitación de tipo armónica.



Figura 8. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en doble transmisión de tornillo-bola: 1) vástago del amortiguador, 2) tornillo izquierdo, 3) tornillo derecho, 4) tuerca del tornillo, 5) embrague unidireccional, 6) engrane, 7) piñón y 8) generador eléctrico [55].

Respecto a los amortiguadores regenerativos basados en el mecanismo piñón-cremallera, estos pueden incrementar la densidad de regeneración de energía a través de un sistema de transmisión de potencia (Figura 6 b). Dado que estos dispositivos utilizan un generador

electromagnético rotatorio, el movimiento vertical oscilatorio del sistema de suspensión se debe convertir en movimiento rotacional unidireccional. Para lograr tal objetivo, este tipo de dispositivo utiliza dos embragues unidireccionales con la finalidad de aprovechar los estados de tensión y de compresión del amortiguador. Además, se utiliza un tren de potencia simple para aumentar la velocidad de rotación del generador eléctrico. A diferencia del amortiguador electromecánico basado en la transmisión tornillo-bola, la velocidad de rotación del generador está directamente influenciada por el paso de rosca del tornillo. Sin embargo, al incrementar la relación de transmisión de potencia en ambos dispositivos, se agregan efectos de inercia rotacional al sistema de suspensión. Se ha demostrado que al añadir niveles altos de inercia en estos tipos de amortiguadores se produce un efecto perjudicial en los índices dinámicos del sistema de suspensión.

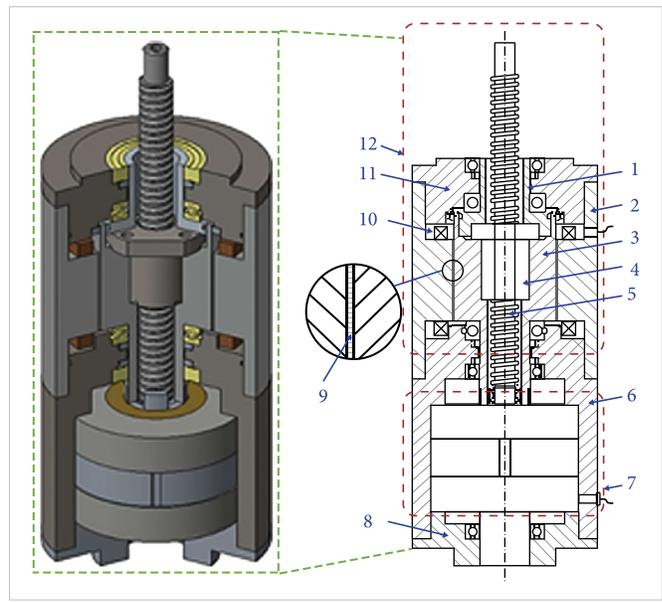


Figura 9. Amortiguador regenerativo electromecánico autoalimentado basado en el mecanismo tornillo-bola: 1) manga de conexión, 2) carcasa del estator, 3) rotor, 4) tuerca del tornillo de bola, 5) eje del tornillo de bola (por ejemplo, vástago de embolo), 6) carcasa del generador, 7) salida de energía eléctrica, 8) cubierta 2, 9) fluido magnetorreológico (FMR), 10) bobina, 11) cubierta 1, 12) mecanismo de amortiguamiento controlable [56].

Con el objetivo de analizar paraméricamente este efecto dinámico, Li *et al.* [58] diseñaron y evaluaron la capacidad de regeneración de energía de un amortiguador regenerativo basado en la transmisión piñón-cremallera. Además, en esa investigación se recalcó que la eficiencia mecánica de este tipo de dispositivos se encuentra en el rango 33-63 % considerando diferentes frecuencias

de excitación y de cargas eléctricas del generador eléctrico. En las pruebas experimentales se demostró que el dispositivo fue capaz de recolectar una potencia pico de 67.5 watts y una potencia media de 19.2 watts, considerando que la velocidad del vehículo es de 48 km/h. Sin embargo, el dispositivo sufrió efectos perjudiciales en el sistema de transmisión de potencia a frecuencias altas de excitación [59]. De hecho, estos investigadores afirmaron que el amortiguador electromecánico con transmisión tornillo-bola presenta mayor dificultad de operación a frecuencias altas de excitación mayores a 7 Hz, a diferencia del amortiguador electromecánico con transmisión piñón-cremallera ofreció mejor rendimiento a frecuencias altas.

Recientemente, Guo *et al.* [60] realizaron un estudio sobre el efecto dinámico del amortiguador electromecánico con y sin mecanismo de rectificación de movimiento en diferentes tipos de vehículos. Ellos demostraron que el amortiguador regenerativo sin mecanismo de rectificación funciona mejor considerando niveles bajos de inercia rotacional, lo cual significa que no se alteran drásticamente los índices dinámicos del sistema de suspensión. Además, el amortiguador electromecánico con mecanismo de rectificación presenta mayor robustez a frecuencias altas de excitación que el anterior. Es importante notar que, para ambos casos de diseño, la cantidad de inercia incluida en el mecanismo de transmisión se debe considerar seriamente para el análisis dinámico de recolección de energía y de los índices dinámicos del sistema. De hecho, esta consideración de diseño fue también reafirmada por Zhang *et al.* [11], [61], quienes diseñaron un amortiguador regenerativo basado en una transmisión mecánica que consistía de un sistema de doble embrague para aprovechar los estados (tensión y compresión) del movimiento del amortiguador (Figura 10).

Este amortiguador regenerativo recolectó una potencia promedio de 4.302 watts con una eficiencia del 44.24 %, considerando excitación armónica a 2.5 Hz y 7.5 mm de frecuencia y amplitud, respectivamente. En vista del potencial de amplificación de movimiento de este tipo de amortiguador, se han realizado investigaciones recientes sobre el potencial de regeneración de energía vibratoria en las suspensiones de los ferrocarriles y en los cables de transmisión de energía eléctrica [62], [63].

Por otra parte, el amortiguador electromecánico basado en el mecanismo tornillo algebraico (*algebraic screw*

*mechanism*) ha sido propuesto recientemente para resolver los inconvenientes de ineficiencia de regeneración de energía de los amortiguadores regenerativos basados ya sea en la transmisión de tipo tornillo-bola o en la de piñón-cremallera [64]. De hecho, Maravandi y Moallem [65] propusieron un cosechador de energía basado en el diseño estructural del mecanismo de tornillo algebraico, el cual está compuesto de un mecanismo de dos eslabones móviles (*two-leg mechanism*) para convertir el movimiento vertical bidireccional en movimiento rotacional unidireccional, un reductor de transmisión de potencia, y un motor sin escobillas (*brushless*) rotatorio de tres fases. Además, este dispositivo demostró una eficiencia de regeneración de energía del 78 %. Aunque, el dispositivo demostró una eficiencia elevada de regeneración de energía, los niveles de amortiguamiento eran pobres.

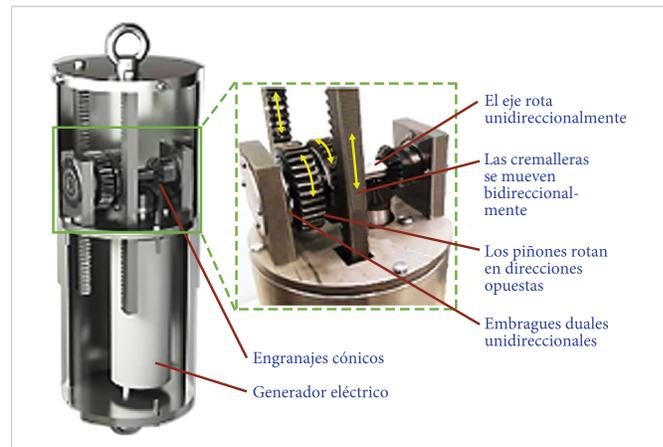


Figura 10. Amortiguador regenerativo electromecánico con transmisión piñón-cremallera y con doble sistema de embragues unidireccionales [11].

Basado en este tipo de mecanismo de conversión de movimiento, Syuhri *et al.* [66] diseñaron un cosechador de energía cinética que utilizaba una transmisión de engranajes epicíclicos para aumentar la velocidad de rotación del eje generador electromagnético. Se observó que el valor máximo para la potencia mecánica y regenerativa se alcanza en 4.67 y 3.14 watts, respectivamente. Esto significa que la eficiencia del dispositivo se encuentra en 67.29 %, es decir, puede convertir el 67.29 % de la energía mecánica en energía eléctrica, mientras que el 32.71 % se disipa en forma de calor. Esto se debe principalmente al fenómeno de fricción mecánica, las no linealidades y los efectos elásticos del dispositivo. A su vez, Zhang *et al.* [67], [68] diseñaron y construyeron un amortiguador regenerativo electromecánico de ac-

cionamiento directo e indirecto, compuesto principalmente por un mecanismo novedoso de conversión y amplificación de movimiento llamado mecanismo de brazo-dentado (*arm-teeth mechanism*) que convierte el movimiento vertical bidireccional en movimiento rotacional unidireccional (Figura 11). El dispositivo presentó un buen compromiso entre el índice del confort y el de la regeneración de energía hasta 13 Hz de frecuencia de excitación. Sin embargo, el dispositivo puede sufrir daños estructurales bajo el efecto de frecuencias altas de excitación, que generalmente ocurren cuando la velocidad de conducción del vehículo es grande. Más tarde, los mismos autores realizaron un análisis de sensibilidad paramétrica considerando los modelos dinámicos de la cuarta parte, la mitad y el completo del vehículo, determinando que el amortiguador regenerativo trabaja mejor a baja frecuencia de excitación [69].

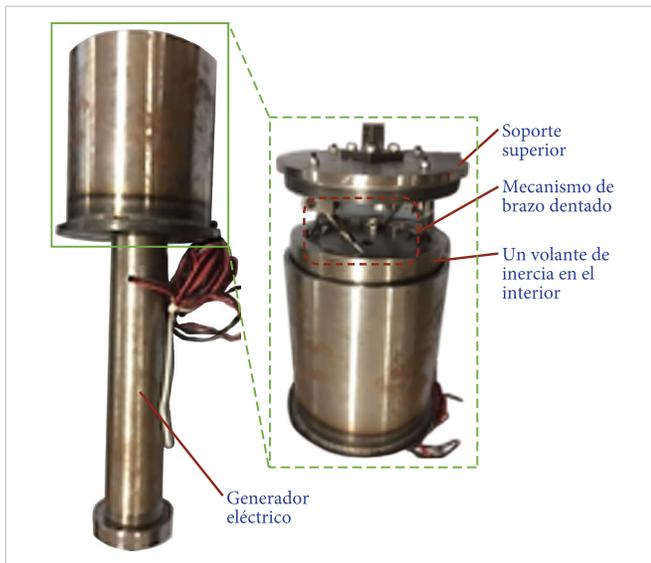


Figura 11. Amortiguador electromecánico de accionamiento indirecto basado en el mecanismo de brazo-dentado [68].

Inspirados en el trabajo de Zhang et al. [69], Abdelkareem et al. [70] demostraron teóricamente mediante simulaciones numéricas exhaustivas que el amortiguador regenerativo mostrado en la Figura 11 puede cosechar hasta 200 watts cuando se acopla a modelos dinámicos de vehículos pesados con semirremolque articulado. Por otro lado, Salman et al. [71] diseñaron un amortiguador regenerativo electromecánico basado principalmente en un módulo de transmisión de potencia mecánica, el cual consta de engranajes helicoidales y embragues unidireccionales de rodillos cónicos que convierten el movimiento vertical bidireccional del eje en movimiento rotacional unidireccional (Figura 12).

El dispositivo demostró la capacidad de regenerar la energía vibratoria con una eficiencia promedio del 40 % y además se obtuvo también una potencia promedio de 270 watts, considerando una frecuencia de excitación de 2.5 Hz y una amplitud de vibración de 5 mm. Aunque este transductor electromecánico demostró eficiencia alta de regeneración de energía cinética, se deben realizar más estudios en términos de viabilidad de implementación, efectos positivos y perjudiciales en los índices dinámicos del sistema de suspensión, y análisis mecánico de los elementos estructurales, etc. Vale la pena mencionar que la eficiencia de regeneración de energía de estos dispositivos se encuentra entre el 5 % y 70 %, tal como se presentó en el trabajo de Múčka [72].

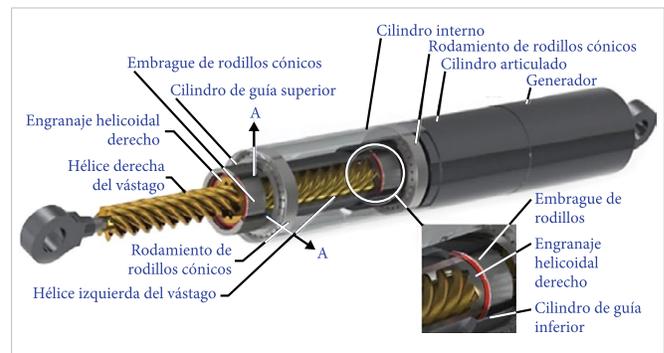


Figura 12. Amortiguador regenerativo con transmisión mecánica de engranajes helicoidales y embragues unidireccionales de rodillos [71].

Durante los últimos años, las investigaciones en este sentido se han orientado en el mejoramiento del mecanismo de conversión de movimiento, utilizando diferentes tipos de transmisiones mecánicas para aumentar la eficiencia de conversión de energía. Li et al. [73] propusieron un novedoso mecanismo de conversión de movimiento vertical bidireccional usando dos cremalleras de roscas helicoidales opuestas, dos engranes helicoidales de diámetros diferentes y embragues unidireccionales (*overrunning clutch*) (Figura 13). Los resultados experimentales demostraron que la eficiencia máxima de conversión de energía mecánica del dispositivo fue de 65.02 %, considerando excitación de tipo armónica.

Aunque, el amortiguador regenerativo basado principalmente en la transmisión cremallera-engranes helicoidales de roscas opuestas logra una alta densidad de regeneración de energía, muchos aspectos de diseño mecánico no se consideraron, principalmente, las cargas de empuje que generan los engranes helicoidales que, de hecho, perjudican a los embragues. Otro tipo de mecanismo de conversión de movimiento novedoso fue diseñado por

Ali et al. [74], quienes en lugar de utilizar una cremallera o un tornillo como elementos primarios de conversión de movimiento, recurrieron a una leva cilíndrica de ranura helicoidal acoplada a un seguidor. Parte de la leva se conecta a un pequeño diferencial basado en engranes cónicos y en cojinetes bidireccionales (*two-way bearing*) para producir un movimiento rotacional unidireccional (Figura 14). Cuando el dispositivo se sometió a evaluación experimental, la eficiencia de regeneración de energía fue 51.4 % bajo excitación armónica.



Figura 13. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en cremalleras y engranes helicoidales de roscas opuestas: 1) cremallera helicoidal, 2) engrane helicoidal para producir rotación horaria, 3) embrague unidireccional, 4) engrane helicoidal para generar rotación anti-horaria, 5) eje de accionamiento, 6) placa circular inferior, 7) acoplador mecánico, 8) caja de engranes planetarios y 9) el generador eléctrico (*DC brushless motor*) [73].

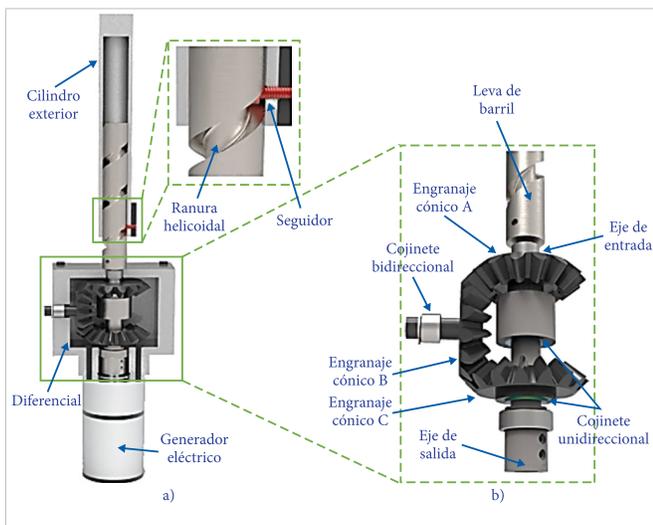


Figura 14. Amortiguador regenerativo electromecánico basado en el mecanismo leva de barril-diferencial: a) vista lateral del transductor electromecánico y b) módulo de transmisión de potencia mecánica [74].

Es importante mencionar que algunas compañías de la industria automotriz, como Audi, Hyundai y Honda, están desarrollando amortiguadores regenerativos rotatorios que ya están siendo instalados en vehículos comerciales. De hecho, el grupo de investigación de Audi presentó un novedoso sistema de regeneración de energía vibratoria llamado amortiguador regenerativo electromecánico rotatorio (eRot), que fue manufacturado utilizando elementos de transmisión mecánica [75]. Sin embargo, es de esperarse que las industrias automotrices no revelen los secretos del funcionamiento de dicha tecnología.

Inspirado en la tecnología de los amortiguadores regenerativos rotatorios, Galluzzi et al. [76] diseñaron un amortiguador similar al eRot que consiste básicamente de un sistema de eslabonamiento, una caja de cambios para convertir el movimiento vertical bidireccional de la suspensión en movimiento rotacional unidireccional y de una máquina eléctrica para producir electricidad (Figura 15). Los autores demostraron experimentalmente que la eficiencia de regeneración de energía del transductor regenerativo rotatorio es de 59.86 % y que su capacidad de producir fuerzas de amortiguamiento es elevada.

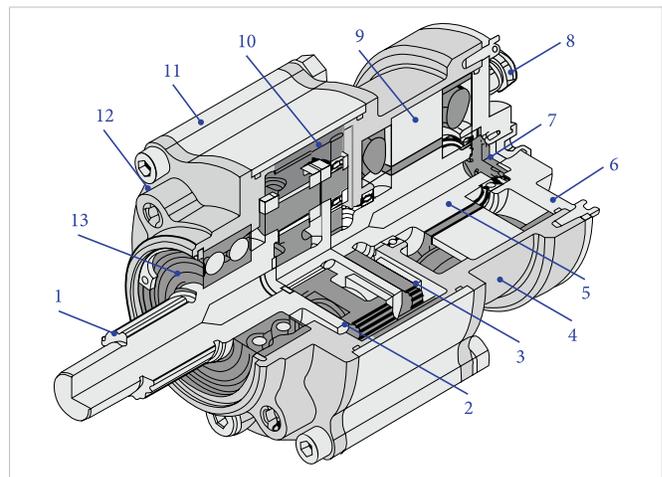


Figura 15. Vista isométrica del amortiguador regenerativo rotatorio: 1) eje estriado de entrada, 2) primera etapa, 3) segunda etapa, 4) carcasa del motor, 5) rotor, 6) cubierta posterior, 7) sensor de posición angular, 8) prensaestopas [x4], 9) estator, 10) corona exterior tipo anillo, 11) carcasa de la caja de cambios, 12) cubierta frontal y 13) cojinete de entrada [76].

### 3.2. Amortiguadores regenerativos electrohidráulicos

Los amortiguadores regenerativos electrohidráulicos están compuestos principalmente de válvulas de retención (*check valves*), tuberías hidráulicas, motores y

bombas hidráulicas, acumulador de gas o aceite y un generador eléctrico. Las válvulas de retención se utilizan para direccionar el flujo de fluido en las tuberías y proporcionar las fuerzas de amortiguamiento requeridas por el sistema de suspensión, mientras que el acumulador hidráulico se utilizan para garantizar la estabilidad de los niveles de fuerza de amortiguamiento en los estados de compresión y tensión del amortiguador. Cuando el fluido entra al motor hidráulico, se produce trabajo mecánico directamente. Luego, esta energía mecánica se transforma en electricidad por medio de un generador electromagnético rotatorio [77]-[79].

Aunque, el costo de estos tipos de dispositivos es alto, estos proporcionan fuerzas grandes de amortiguamiento sin aumentar su tamaño físico, comparado con los amortiguadores regenerativos electromecánicos y los electromagnéticos lineales. Al emplear un circuito hidráulico, es posible regular los impactos a frecuencias altas y, así mismo, suavizar la respuesta del rotor del generador. En aplicaciones reales, un sistema hidráulico es más durable debido a que el desgaste por fricción entre sus componentes mecánicos y el flujo de fluido es menor que el de un sistema mecánico compuesto de elementos sólidos (piñón-cremallera o tornillo-bola). Por esta razón, los amortiguadores hidráulicos disfrutaron de una de las mayores participaciones en el mercado de la industria automotriz.

En vista del potencial de la capacidad de amortiguación de estos tipos de amortiguadores regenerativos, Fang *et al.* [80] fabricaron un amortiguador regenerativo electrohidráulico (HESA) y demostraron experimentalmente que el dispositivo cosechó aproximadamente 200 watts con una eficiencia del 16.6 %. Más tarde, Li y Tse [81] propusieron un amortiguador electrohidráulico sin mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento y observaron que se producían fuerzas de impacto en el dispositivo a frecuencias altas de excitación (Figura 16).

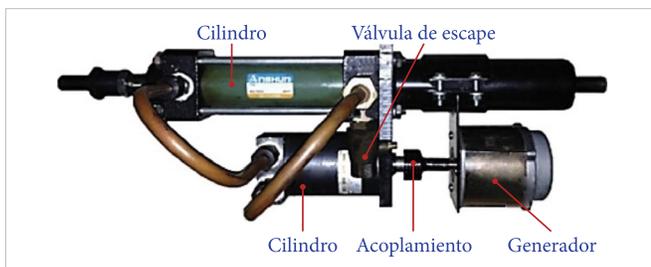


Figura 16. Amortiguador regenerativo electrohidráulico sin mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento [81].

Además, Li *et al.* [82] diseñaron y fabricaron un amortiguador regenerativo electrohidráulico que consistía básicamente de cuatro válvulas de retención, un motor hidráulico y un generador eléctrico de tres fases. Las válvulas de retención se utilizaron para crear un mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento (HMR, por sus siglas en inglés) del flujo de fluido, y posteriormente accionar el eje de motor hidráulico en una sola dirección. El HMR se utilizó para disminuir las fuerzas de impacto del dispositivo y, así mismo, suavizar la respuesta del rotor del generador. El trabajo mecánico producido por el motor hidráulico se transformó en energía eléctrica útil a través de un generador eléctrico trifásico.

En dicha investigación se reveló que, el dispositivo logró recolectar una potencia instantánea de 248.8 watts y una potencia promedio de 114.1 watts con una eficiencia máxima de regeneración de energía del 38.81 % cuando la frecuencia de excitación fue de 2 Hz y 8 mm de amplitud de vibración (Figura 17 a). Adicionalmente, el proceso de recolección de energía, rectificación de movimiento del flujo de fluido y de rectificación de la energía alterna a energía directa se muestra en la Figura 17 b). Nótese que en este proceso, el núcleo del diseño del amortiguador regenerativo es un cilindro hidráulico, el cual se divide en dos cámaras por un pistón.

La razón de utilizar un cilindro con dos vástagos es para garantizar que el flujo de aceite entre las dos cámaras sea idéntico. Uno de los vástagos se conecta directamente a una terminal del amortiguador mientras que la otra se acopla a través de un acoplamiento flexible. Los dos puertos (11 y 12) del cilindro se conectan a los dos puertos (21 y 22) del motor hidráulico a través de un rectificador hidráulico. El eje de salida de este motor se conecta a un generador electromagnético trifásico, cuya electricidad de salida se utiliza para cubrir la demanda de potencia eléctrica del tren de propulsión.

El diseño del mecanismo de rectificación hidráulico hace posible que la transferencia de energía de vibración en el sistema de regeneración de energía del amortiguador se realice de manera suave, es decir, las fuerzas de impacto se reducen. De esta manera, el dispositivo puede lograr simultáneamente tanto la capacidad de amortiguamiento requerido como la regeneración de energía cinética.

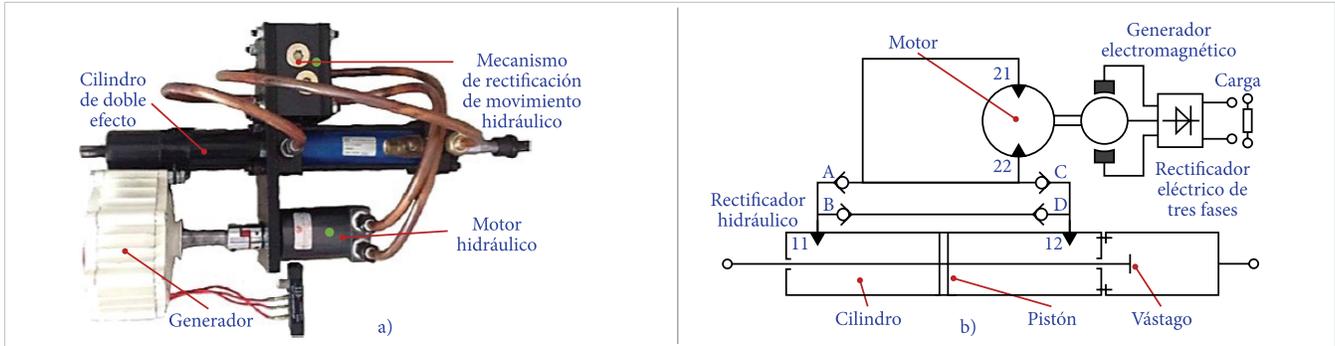


Figura 17. Amortiguador regenerativo electrohidráulico con mecanismo hidráulico de rectificación de movimiento: a) dispositivo en 3D y b) circuito de recolección de energía [82].

Adicionalmente, Zhang *et al.* [83] propusieron un amortiguador regenerativo electrohidráulico con HMR que proporciona amortiguamiento asimétrico para lograr eficientemente fuerzas de adherencia de los neumáticos sobre la carretera. Con el objetivo de cuantificar la capacidad de regeneración de energía, se utilizaron algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés), considerando los radios del cilindro y del vástago del amortiguador, el gasto volumétrico de la bomba hidráulica y las cargas eléctricas del generador electromagnético. A través de la optimización GA, el dispositivo proporcionó una potencia cosechada de 33.4 watts con una eficiencia de regeneración de energía del 70-73 % cuando la frecuencia de excitación fue de 1.67 Hz y la amplitud de desplazamiento de 50 mm.

Más tarde, Zhang *et al.* [84] diseñaron y realizaron pruebas experimentales de un amortiguador electrohidráulico de doble tubo con la capacidad de regeneración de energía para su uso en sistemas de suspensión semiactiva y activa (Figura 18). Este dispositivo consiste de un tubo interno ubicado entre el tubo de presión y el tubo de reserva, el cual tiene un orificio de circulación para conectar la cavidad superior con la entrada del motor hidráulico. La salida del motor hidráulico está conectada a la cavidad de reserva a través de la tubería de aceite. Para lograr un flujo de fluido unidireccional, se añade una válvula de retención en la cara superior del pistón y otra en la base del amortiguador. El mecanismo de rectificación del flujo del fluido solo contiene dos válvulas de retención con el objetivo de reducir el tamaño del amortiguador regenerativo, el cual también permite que el proceso de operación sea más sencillo que los anteriores. Nótese que el nitrógeno funciona principalmente como un acumulador hidráulico, el cual le proporciona estabilidad al nivel de presión en el flujo del fluido en ambos estados de movimiento del dispositivo.

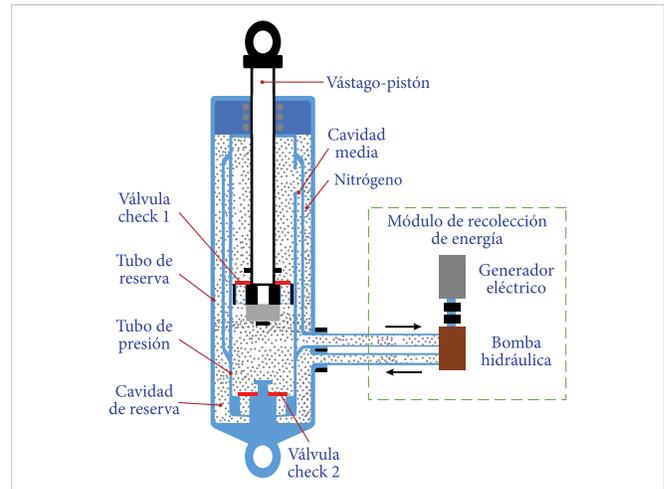


Figura 18. Amortiguador regenerativo electrohidráulico de doble tubo con mecanismo de rectificación de movimiento [84].

En otro estudio, Galluzzi *et al.* [85], [86] mejoraron el diseño de los amortiguadores regenerativos electrohidráulicos, considerando aspectos de diseño sumamente importantes, tales como las pérdidas de energía hidráulica en el circuito hidrostático, la eficiencia volumétrica e hidráulica del motor hidráulico, la eficiencia mecánica y la eficiencia eléctrica del generador eléctrico. Posteriormente, mediante planos de eficiencias establecidos por los niveles de fuerza-velocidad del fluido en el motor hidráulico se determinó que el dispositivo proporcionó una eficiencia máxima de conversión de energía del 41.7 %.

Con el objetivo de mejorar la capacidad de regeneración de energía vibratoria y las dinámicas dominantes de los vehículos, Zou *et al.* [6], [87]-[89] propusieron un sistema de suspensión interconectado por amortiguadores regenerativos electrohidráulicos (HIS-HESA, por sus siglas en inglés). La idea subyacente de conectar todos los amortiguadores regenerativos a una unidad central de conversión de energía hidráulica a

electricidad es para reducir el número de componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos. Así, el sistema regenerativo consistía principalmente de cuatro amortiguadores hidráulicos con mecanismos de conversión de movimiento del flujo de fluido (HMR), dos acumuladores de presión baja y alta, un motor hidráulico y un circuito eléctrico de generación de potencia eléctrica.

De acuerdo a los resultados numéricos obtenidos, el HIS-HESA puede recolectar una potencia de alrededor de 190 watts, considerando las dinámicas de un modelo vehículo de siete grados de libertad (*full vehicle suspension system*). Adicionalmente, este sistema regenerativo mejoró tanto el índice del confort como el de la seguridad de conducción en un 33 % y 20 %, respectivamente. Los autores también recalcaron que el uso de este dispositivo es para camiones pesados debido a que estos disipan mayor cantidad de energía cinética comparado con los otros tipos de vehículos. También, se observó un equilibrio entre el índice del confort y la capacidad de regeneración de energía cuando la resistencia externa del generador eléctrico varía.

En vista de estos resultados teóricos, Qin *et al.* [90] desarrollaron recientemente la experimentación de la suspensión regenerativa interconectada hidráulicamente (EH-HIS), demostrando cualitativamente una mejora significativa en la capacidad de regeneración de energía y en los índices de rendimiento de la suspensión. En términos cuantitativos, el EH-HIS cosechó una potencia promedio de 82 watts con una eficiencia de 18 %, considerando que la frecuencia y amplitud de excitación son 2 Hz y 20 mm, respectivamente.

Recientemente, la compañía Levant Power Corp. desarrolló un amortiguador regenerativo electrohidráulico compactado llamado GenShock, con el objetivo de aumentar la eficiencia del combustible de los vehículos de pasajeros y, simultáneamente, proporcionar fuerzas activas al sistema de suspensión [91]. Tal como ha sido reportado por Abdelkareem *et al.* [5], [92], [93], existen muchas oportunidades de investigación en el tema de la regeneración de energía vibratoria en las suspensiones automotrices. En los próximos años, se espera que se instalen nuevos amortiguadores regenerativos no solo en camiones pesados, porque en ellos existe mayor potencial de regeneración de energía, sino también en vehículos de pasajeros.

## IV. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

El concepto de regeneración de energía vibratoria en las suspensiones automotrices es una línea de investigación prometedora en energías limpias, sin embargo, para lograr tal objetivo se requiere cubrir muchos aspectos de filosofía de diseño de los amortiguadores regenerativos. De hecho, los esfuerzos de investigación científica se han centrado principalmente en el mejoramiento del mecanismo de conversión y amplificación de energía mecánica ya sea para los amortiguadores regenerativos electromecánicos o para los electrohidráulicos. Con el objetivo de asegurar la asequibilidad del uso de amortiguadores regenerativos en vehículos eléctricos puros y en híbridos, se recomiendan realizar los siguientes estudios:

- Para evaluar de manera realista la eficiencia de conversión de energía mecánica de los diferentes tipos de amortiguadores regenerativos electromecánicos, es necesario incluir en el modelado matemático las no linealidades, la eficiencia del generador eléctrico, los efectos elásticos de los elementos estructurales, la eficiencia mecánica, etc.
- Evaluar el potencial de regeneración de energía vibratoria para cada tipo de amortiguador regenerativo electromecánico no lineal acoplado al modelo de vehículo completo, considerando condiciones reales de conducción.
- Formular problemas de optimización multiobjetivo con la finalidad de optimizar los parámetros involucrados en el mecanismo de conversión de movimiento, del generador eléctrico, en efectos inerciales parasitarios, en los análisis de fatiga de los elementos estructurales, etc.
- Aunque se ha demostrado en la literatura que el potencial de regeneración de energía de un sistema de suspensión regenerativa depende fuertemente de la velocidad de conducción del vehículo, la rugosidad de la carretera y de la rigidez del neumático, se recomienda realizar análisis de sensibilidad paramétrica en la capacidad de regeneración de energía para cada tipo de amortiguador, variando sus parámetros físicos.
- En la literatura se observó que los amortiguadores regenerativos rotatorios pueden superar a los electromecánicos, electromagnéticos e incluso a los

electrohidráulicos en la capacidad de regeneración de energía y en la de producir fuerzas grandes de amortiguamiento. Sin embargo, no se reportó un análisis de sensibilidad paramétrica exhaustivo en lo que respecta a los índices de rendimiento del sistema de suspensión basado en el amortiguador regenerativo rotatorio.

- Se ha demostrado teórica y experimentalmente que las suspensiones interconectadas hidráulicamente basadas en amortiguadores regenerativos electrohidráulicos presentan mayor potencial de regeneración de energía y un índice de rendimiento dinámico superior a las suspensiones convencionales. Sería conveniente realizar un análisis comparativo entre las suspensiones automotrices basadas en transductores regenerativos rotatorios con aquellas compuestas de amortiguadores regenerativos electrohidráulicos.
- En vista del potencial dinámico del amortiguador regenerativo rotatorio, sería conveniente diseñar leyes de control con la finalidad de diseñar una suspensión regenerativa autoalimentada y, posteriormente, comparar los resultados con los de la suspensión regenerativa basada en los amortiguadores regenerativos electromagnéticos lineales autoalimentados.
- También sería conveniente realizar pruebas de campo del amortiguador regenerativo rotatorio acoplado a una suspensión automotriz.
- Diseñar leyes de control para la gestión adecuada de la energía almacenada en el banco de supercondensadores, ultracapacitores y baterías electroquímicas.

Es cierto que, a medida que aumentan los problemas energéticos en la industria de la transportación, al igual que el sistema de recuperación de energía cinética (KERS), los amortiguadores regenerativos pueden contribuir de manera sustancial en la mejora de los estados de salud del sistema de baterías que alimenta, ya sea a un tren de potencia eléctrico o a un tren de potencia híbrido. Esto ha originado un incremento significativo en la investigación científica no solo en la mejora de estos tipos de dispositivos, sino en abordarlos como cosechadores de energía marítima, energía vibratoria producida por sismos y energía cinética producida por las turbulencias del aire que inciden sobre los cables, entre otras.

## REFERENCIAS

- [1] L. Pugi, M. Pagliai, A. Nocentini, G. Lutzemberger y A. Pretto, “Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking”, *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 96-115, 2017, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.11.047](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.047).
- [2] K. Itani, A. De Bernardinis, Z. Khatir y A. Jammal, “Comparative analysis of two hybrid energy storage systems used in a two front wheel driven electric vehicle during extreme start-up and regenerative braking operations”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 144, pp. 69-87, 2017, doi: [10.1016/j.enconman.2017.04.036](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.036).
- [3] L. Li, Y. Zhang, C. Yang, B. Yan y C. M. Martinez, “Model predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 111, pp. 299-314, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2015.12.077](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.077).
- [4] D. Zhao, “Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke–Zhao thermo-acoustic-piezo system”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 66, pp. 87-97, 2013, doi: [10.1016/j.enconman.2012.09.025](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.025).
- [5] M. A. A. Abdelkareem et al., “Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review”, *Appl. Energy*, vol. 229, no. jul., pp. 672-699, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.08.030](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030).
- [6] J. Zou, X. Guo, M. A. A. Abdelkareem, L. Xu y J. Zhang, “Modelling and ride analysis of a hydraulic interconnected suspension based on the hydraulic energy regenerative shock absorbers”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 127, pp. 345-369, 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.02.047](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.047).
- [7] H. X. Zou et al., “Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: Principles, methods and applications”, *Appl. Energy*, vol. 255, no. feb., 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113871](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113871).
- [8] D. Shi, P. Pisu, L. Chen, S. Wang y R. Wang, “Control design and fuel economy investigation of power split HEV with energy regeneration of suspension”, *Appl. Energy*, vol. 182(C), pp. 576-589, 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.08.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.034).
- [9] ISO, “ISO 8608:2016 Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data”, ISO.

- org. <https://www.iso.org/standard/71202.html> (acceso mar. 20, 2022).
- [10] X. Xie y Q. Wang, “A mathematical model for piezoelectric ring energy harvesting technology from vehicle tires”, *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 94, pp. 113-127, 2015, doi: 10.1016/j.ijengsci.2015.05.004.
- [11] Z. Zhang et al., “A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle”, *Appl. Energy*, vol. 178, pp. 177-188, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.054.
- [12] D. Karnopp, “Permanent Magnet Linear Motors Used as Variable Mechanical Dampers for Vehicle Suspensions”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 18, no. 4, pp. 187-200, 1989, doi: 10.1080/00423118908968918.
- [13] Y. Suda y T. Shiiba, “A New Hybrid Suspension System with Active Control and Energy Regeneration”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 24, supl. 1, pp. 641-654, 1996, doi: 10.1080/00423119608969226.
- [14] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani y Y. Zhou, “Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 4, pp. 1-10, 2010, doi: 10.1088/0964-1726/19/4/045003.
- [15] B. L. J. Gysen, T. P. J. Van Der Sande, J. J. H. Paulides y E. A. Lomonova, “Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension”, en *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1384-1393, may. 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2131160.
- [16] B. Ebrahimi, H. Bolandhemmat, M. B. Khamesee y F. Golnaraghi, “A hybrid electromagnetic shock absorber for active vehicle suspension systems”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 49, nos. 1-2, pp. 311-332, 2011, doi: 10.1080/00423111003602400.
- [17] E. Asadi, R. Ribeiro, M. B. Khamesee y A. Khajepour, “A new adaptive hybrid electromagnetic damper: modelling, optimization, and experiment”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 7, pp. 1-14, 2015, doi: 10.1088/0964-1726/24/7/075003.
- [18] G. Hu, Y. Lu, S. Sun y W. Li, “Performance Analysis of a Magnetorheological Damper with Energy Harvesting Ability”, *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-10, 2016, doi: 10.1155/2016/2959763.
- [19] L. Chen, D. Shi, R. Wang y H. Zhou, “Energy conservation analysis and control of hybrid active semiactive suspension with three regulating damping levels”, *Shock Vib.*, vol. 2016, pp. 1-14, 2016, doi: 10.1155/2016/6196542.
- [20] C. Chen y W. -H. Liao, “A self-sensing magnetorheological damper with power generation”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 2, pp. 1-14, 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/2/025014.
- [21] K. -M. Choi, H. -J. Jung, H. -J. Lee y S. -W. Cho, “Feasibility study of an MR damper-based smart passive control system employing an electromagnetic induction device”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 6, pp. 2323-2329, 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/6/036.
- [22] Y. -T. Choi y N. M. Wereley, “Self-Powered Magnetorheological Dampers”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 131, no. 4, pp. 1-5, 2009, doi: 10.1115/1.3142882.
- [23] Z. Gao, S. Chen, Y. Zhao y Z. Liu, “Numerical evaluation of compatibility between comfort and energy recovery based on energy flow mechanism inside electromagnetic active suspension”, *Energy*, vol. 170, no. 5, pp. 521-536, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.193.
- [24] R. Ding, R. Wang, X. Meng y L. Chen, “Energy consumption sensitivity analysis and energy-reduction control of hybrid electromagnetic active suspension”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 134, no. 301, 2019, doi: 10.1016/j.ymssp.2019.106301.
- [25] M. -T. Duong, Y. -D. Chun, P. -W. Han, B. -G. Park, D. -J. Bang and J. -K. Lee, “Optimal Design of a Novel Single-Phase 8-Slot 8-Pole Tubular Electromagnetic Shock Absorber to Harvest Energy”, en *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 2, pp. 1180-1190, feb. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2898591.
- [26] Z. Jin-qiu, P. Zhi-zhao, Z. Lei y Z. Yu, “A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles”, en *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2013, vol. III, pp. 3-6, ISBN: 978-988-19252-9-9.
- [27] L. Zuo y X. Tang, “Large-scale vibration energy harvesting”, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, no. 11, pp. 1405-1430, 2013, doi: 10.1177/1045389X13486707.

- [28] B. Lafarge, S. Grondel, C. Delebarre, O. Curea y C. Richard, "Linear electromagnetic energy harvester system embedded on a vehicle suspension : From modeling to performance analysis", *Energy*, vol. 225(C), pp. 1-16, 2021, doi: [10.1016/j.energy.2021.119991](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119991).
- [29] R. Zhou et al., "Experimental validations of a magnetic energy-harvesting suspension and its potential application for self-powered sensing", *Energy*, vol. 239(C), pp. 1-13, 2022, doi: [10.1016/j.energy.2021.122205](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122205).
- [30] Z. Zhang, X. Zhang, Y. Rasim, C. Wang, B. Du y Y. Yuan, "Design, modelling and practical tests on a high-voltage kinetic energy harvesting (EH) system for a renewable road tunnel based on linear alternators", *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 152-161, 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2015.11.096](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.096).
- [31] K. Kecik, A. Mitura, S. Lenci y J. Warminska, "Energy harvesting from a magnetic levitation system", *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 94, pp. 200-206, 2017, doi: [10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021](https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.021).
- [32] C. Wei y X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 1-18, 2017, doi: [10.1016/j.rser.2017.01.073](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073).
- [33] A. Haroun, I. Yamada y S. Warisawa, "Study of electromagnetic vibration energy harvesting with free/impact motion for low frequency operation", *J. Sound Vib.*, vol. 349, pp. 389-402, 2015, doi: [10.1016/j.jsv.2015.03.048](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.03.048).
- [34] Z. Liu, X. Wang, S. Ding, R. Zhang y L. McNabb, "A new concept of speed amplified nonlinear electromagnetic vibration energy harvester through fixed pulley wheel mechanisms and magnetic springs", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 126, pp. 305-325, 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.02.010](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.02.010).
- [35] M. Gao, Y. Wang, Y. Wang y P. Wang, "Experimental investigation of non-linear multi-stable electromagnetic-induction energy harvesting mechanism by magnetic levitation oscillation", *Appl. Energy*, vol. 220, pp. 856-875, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.03.170](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.170).
- [36] S. Zhu, W. A. Shen y Y. L. Xu, "Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing", *Eng. Struct.*, vol. 34, pp. 198-212, 2012, doi: [10.1016/j.engstruct.2011.09.024](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.09.024).
- [37] C. Wei y H. Taghavifar, "A novel approach to energy harvesting from vehicle suspension system: Half-vehicle model", *Energy*, vol. 134, pp. 279-288, 2017, doi: [10.1016/j.energy.2017.06.034](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.034).
- [38] L. B. Zhang, H. L. Dai, A. Abdelkefi, S. X. Lin y L. Wang, "Theoretical modeling, wind tunnel measurements, and realistic environment testing of galloping-based electromagnetic energy harvesters", *Appl. Energy*, vol. 254(C), 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113737](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113737).
- [39] M. -L. Seol, S. -B. Jeon, J. -W. Han y Y. -K. Choi, "Ferofluid-based triboelectric-electromagnetic hybrid generator for sensitive and sustainable vibration energy harvesting", *Nano Energy*, vol. 31, pp. 233-238, 2017, doi: [10.1016/j.nanoen.2016.11.038](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.11.038).
- [40] A. Tonoli, N. Amati, J. G. Detoni, R. Galluzzi y E. Gasparin, "Modelling and validation of electromechanical shock absorbers", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 51, no. 8, pp. 1186-1199, 2013, doi: [10.1080/00423114.2013.789538](https://doi.org/10.1080/00423114.2013.789538).
- [41] Y. Kawamoto, Y. Suda, H. Inoue y T. Kondo, "Modeling of Electromagnetic Damper for Automobile Suspension", *J. Syst. Des. Dyn.*, vol. 1, no. 3, pp. 524-535, 2007, doi: [10.1299/jsdd.1.524](https://doi.org/10.1299/jsdd.1.524).
- [42] N. Amati, A. Festini y A. Tonoli, "Design of electromagnetic shock absorbers for automotive suspensions", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 49, no. 12, pp. 1913-1928, 2011, doi: [10.1080/00423114.2011.554560](https://doi.org/10.1080/00423114.2011.554560).
- [43] M. C. Smith, "The Inerter: A Retrospective", *Annu. Rev. Control. Robot. Auton. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 361-391, 2020, doi: [10.1146/annurev-control-053018-023917](https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023917).
- [44] K. E. Graves, P. G. Iovenitti y D. Toncich, "Electromagnetic regenerative damping in vehicle suspension systems", *Int. J. Veh. Des.*, vol. 24, no. 2/3, pp. 182-197, 2000, doi: [10.1504/IJVD.2000.005181](https://doi.org/10.1504/IJVD.2000.005181).
- [45] M. Montazeri-Gh y O. Kavianipour, "Investigation of the passive electromagnetic damper", *Acta Mech.*, vol. 223, no. 12, pp. 2633-2646, 2012, doi: [10.1007/s00707-012-0735-8](https://doi.org/10.1007/s00707-012-0735-8).
- [46] X. Wang, *Frequency Analysis of Vibration Energy Harvesting Systems*. Estados Unidos de América: Elsevier, 2016, ISBN: 978-0-12-802321-1.

- [47] G. Zhang, J. Cao y F. Yu, “Design of active and energy-regenerative controllers for DC-motor-based suspension”, *Mechatronics*, vol. 22, no. 8, pp. 1124-1134, 2012, doi: [10.1016/j.mechatronics.2012.09.007](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.09.007).
- [48] L. Pires, M. C. Smith, N. E. Houghton y R. A. McMahon, “Design trade-offs for energy regeneration and control in vehicle suspensions”, *Int. J. Control*, pp. 1-18, 2013, doi: [10.1080/00207179.2013.830197](https://doi.org/10.1080/00207179.2013.830197).
- [49] J. Yin, X. Chen, J. Li y L. Wu, “Investigation of equivalent unsprung mass and nonlinear features of electromagnetic actuated active suspension”, *Shock Vib.*, vol. 2015, pp. 1-8, 2015, doi: [10.1155/2015/624712](https://doi.org/10.1155/2015/624712).
- [50] B. Huang, C. -Y. Hsieh, F. Golnaraghi y M. Moallem, “Development and optimization of an energy-regenerative suspension system under stochastic road excitation”, *J. Sound Vib.*, vol. 357, pp. 16-34, 2015, doi: [10.1016/j.jsv.2015.07.004](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.004).
- [51] S. Li, J. Xu, X. Pu, T. Tao y X. Mei, “A novel design of a damping failure free energy-harvesting shock absorber system”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 132, pp. 640-653, 2019, doi: [10.1016/j.ymsp.2019.07.004](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.07.004).
- [52] S. Li, J. Xu, X. Pu, T. Tao, H. Gao y X. Mei, “Energy-Harvesting Variable / Constant Damping Suspension”, *Energy*, vol. 189, 2019, doi: [10.1016/j.energy.2019.116199](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116199).
- [53] L. Xie, J. Li, X. Li, L. Huang y S. Cai, “Damping-tunable energy-harvesting vehicle damper with multiple controlled generators: Design , modeling and experiments”, *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 99, pp. 859-872, 2018, doi: [10.1016/j.ymsp.2017.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.07.005).
- [54] L. Xie, J. Li, S. Cai y X. Li, “Electromagnetic Energy-Harvesting Damper With Multiple Independently Controlled Transducers: On-Demand Damping and Optimal Energy Regeneration”, en *IEEE ASME Trans Mechatron*, vol. 22, no. 6, pp. 2705-2713, dic. 2017, doi: [10.1109/TMECH.2017.2758783](https://doi.org/10.1109/TMECH.2017.2758783).
- [55] Z. Wang, T. Zhang, Z. Zhang, Y. Yuan y Y. Liu, “A high-efficiency regenerative shock absorber considering twin ball screws transmissions for application in range-extended electric vehicles”, *Energy Built Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 36-49, 2019, doi: [10.1016/j.enbenv.2019.09.004](https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2019.09.004).
- [56] X. -X. Bai, W. -M. Zhong, Q. Zou, A. -D. Zhu y J. Sun, “Principle, design and validation of a power-generated magnetorheological energy absorber with velocity self-sensing capability”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 7, pp. 1-18, 2018, doi: [10.1088/1361-665X/aac7ef](https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac7ef).
- [57] Y. Yang, Y. Pian y Q. Liu, “Design of energy harvester using rotating motion rectifier and its application on bicycle”, *Energy*, vol. 179, pp. 222-231, 2019, doi: [10.1016/j.energy.2019.05.036](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.036).
- [58] Z. Li, L. Zuo, G. Luhrs, L. Lin y Y. -x. Qin, “Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests”, en *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 3, pp. 1065-1074, mar. 2013, doi: [10.1109/TVT.2012.2229308](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2229308).
- [59] Z. Li, L. Zuo, J. Kuang y G. Luhrs, “Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier”, *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, pp. 1-10, 2013, doi: [10.1088/0964-1726/22/2/025008](https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025008).
- [60] S. Guo, Y. Liu, L. Xu, X. Guo y L. Zuo, “Performance evaluation and parameter sensitivity of energy-harvesting shock absorbers on different vehicles”, *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 7, pp. 1-25, 2016, doi: [10.1080/00423114.2016.1174276](https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1174276).
- [61] Z. Zhang et al., “Corrigendum to ‘A high-efficiency energy regenerative shock absorber using supercapacitors for renewable energy applications in range extended electric vehicle’ [Appl. Energy 178 (2016) 177-188]”, *Appl. Energy*, vol. 254, 2019, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113634](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113634).
- [62] X. Zhang, Z. Zhang, H. Pan, W. Salman, Y. Yuan y Y. Liu, “A portable high-efficiency electromagnetic energy harvesting system using supercapacitors for renewable energy applications in railroads”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 118, pp. 287-294, 2016, doi: [10.1016/j.enconman.2016.04.012](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.012).
- [63] H. Wang, C. He, S. Lv y H. Sun, “A new electromagnetic vibrational energy harvesting device for swaying cables”, *Appl. Energy*, vol. 228(C), pp. 2448-2461, 2018, doi: [10.1016/j.apenergy.2018.07.059](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.059).
- [64] R. Sabzehgar, A. Maravandi y M. Moallem, “Energy Regenerative Suspension Using an Algebraic Screw Linkage Mechanism”, en *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*,

- vol. 19, no. 4, pp. 1251-1259, ag. 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2277854.
- [65] A. Maravandi y M. Moallem, "Regenerative Shock Absorber Using a Two-Leg Motion Conversion Mechanism", en *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 20, no. 6, pp. 2853-2861, dic. 2015, doi: 10.1109/TMECH.2015.2395437.
- [66] A. Syuhri, W. Hadi y S. N. H. Syuhri, "Damping properties and energy evaluation of a regenerative shock absorber", *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 12, pp. 1385-1397, 2017, doi: 10.1007/s12008-017-0440-x.
- [67] R. Zhang y X. Wang, "Parameter study and optimization of a half-vehicle suspension system model integrated with an arm-teeth regenerative shock absorber using Taguchi method", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 126, pp. 65-81, 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2019.02.020.
- [68] R. Zhang, X. Wang, E. Shami, S. John, L. Zuo y C. Wang, "A novel indirect-drive regenerative shock absorber for energy harvesting and comparison with a conventional direct-drive regenerative shock absorber", *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 111-127, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.096.
- [69] R. Zhang, L. Zhao, X. Qiu, H. Zhang y X. Wang, "A comprehensive comparison of the vehicle vibration energy harvesting abilities of the regenerative shock absorbers predicted by the quarter, half and full vehicle suspension system models", *Appl. Energy*, vol. 272, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115180.
- [70] M. A. A. Abdelkareem, R. Zhang, X. Jing, X. Wang y M. K. A. Ali, "Characterization and implementation of a double-sided arm-toothed indirect-drive rotary electromagnetic energy-harvesting shock absorber in a full semi-trailer truck suspension platform", *Energy*, vol. 239, parte A, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.121976.
- [71] W. Salman et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber using helical gears for powering low-wattage electrical device of electric vehicles", *Energy*, vol. 159, pp. 361-372, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.152.
- [72] P. Můčka, "Energy-harvesting potential of automobile suspension", *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 54, no. 12, pp. 1651-1670, 2016, doi: 10.1080/00423114.2016.1227077.
- [73] H. Li et al., "A high-efficiency energy regenerative shock absorber for powering auxiliary devices of new energy driverless buses", *Appl. Energy*, vol. 295, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117020.
- [74] A. Ali, L. Qi, T. Zhang, H. Li, A. Azam y Z. Zhang, "Design of novel energy-harvesting regenerative shock absorber using barrel cam follower mechanism to power the auxiliaries of a driverless electric bus", *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 48, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101565.
- [75] BioAge Group, "Audi developing electromechanical rotary dampers; potential for energy recuperation from suspension; 48V", GreenCarCongress.com. <https://www.greencarcongress.com/2016/08/audi-developing-electromechanical-rotary-dampers-potential-for-energy-recuperation-from-suspension-4.html> (acceso jul. 15, 2020).
- [76] R. Galluzzi, S. Circosta, N. Amati y A. Tonoli, "Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions", *Mechatronics*, vol. 77, ag. 2021, doi: 10.1016/j.mechatronics.2021.102580.
- [77] J. Mi, L. Xu, S. Guo, L. Meng y M. A. A. Abdelkareem, "Energy harvesting potential comparison study of a novel railway vehicle bogie system with the hydraulic-electromagnetic energy-regenerative shock absorber", en *Proc. 2017 Jt. Rail Conf.*, Filadelfia, Pensilvania, Estados Unidos, abr. 4-7, 2017, doi: 10.1115/JRC2017-2241.
- [78] K. Ahmad y M. Alam, "Design and Simulated Analysis of Regenerative Suspension System with Hydraulic Cylinder, Motor and Dynamo", *SAE Tech. Pap.*, 2017, doi:10.4271/2017-01-1284.
- [79] H. Zhang, X. Guo, L. Xu, S. Hu y Z. Fang, "Parameters analysis of hydraulic-electrical energy regenerative absorber on suspension performance", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 6, 2014, doi: 10.1155/2014/836502.
- [80] Z. Fang, X. Guo, L. Xu y H. Zhang, "Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 5, pp. 1-9, 2013, doi: 10.1155/2013/943528.
- [81] C. Li y P. W. Tse, "Fabrication and testing of an energy-harvesting hydraulic damper", *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 6, 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/6/065024.

- [82] C. Li, R. Zhu, M. Liang y S. Yang, "Integration of shock absorption and energy harvesting using a hydraulic rectifier", *J. Sound Vib.*, vol. 333, no. 17, pp. 3904-3916, 2014, doi: 10.1016/j.jsv.2014.04.020.
- [83] Y. Zhang, X. Zhang, M. Zhan, K. Guo, F. Zhao y Z. Liu, "Study on a novel hydraulic pumping regenerative suspension for vehicles", *J. Franklin Inst.*, vol. 352, no. 2, pp. 485-499, 2015, doi: 10.1016/j.jfranklin.2014.06.005.
- [84] Y. Zhang, H. Chen, K. Guo, X. Zhang y S. E. Li, "Electro-hydraulic damper for energy harvesting suspension: Modeling, prototyping and experimental validation", *Appl. Energy*, vol. 199, pp. 1-12, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.085.
- [85] R. Galluzzi et al., "Regenerative Shock Absorbers and the Role of the Motion Rectifier", *SAE Tech. Pap.*, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1552.
- [86] R. Galluzzi, Y. Xu, N. Amati y A. Tonoli, "Optimized design and characterization of motor-pump unit for energy-regenerative shock absorbers", *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 16-27, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.100.
- [87] J. Zou et al., "Simulation Research of a Hydraulic Interconnected Suspension Based on a Hydraulic Energy Regenerative Shock Absorber", *SAE Tech. Pap.*, 2018, doi: 10.4271/2018-01-0582.
- [88] J. Zou, X. Guo, L. Xu, G. Tan, C. Zhang y J. Zhang, "Design, Modeling y Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension", *Shock Vib.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/3186584.
- [89] M. Peng, X. Guo, J. Zou y C. Zhang, "Simulation Study on Vehicle Road Performance with Hydraulic Electro-magnetic Energy-Regenerative Shock Absorber", *SAE Tech. Pap.*, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1550.
- [90] B. Qin, Y. Chen, Z. Chen y L. Zuo, "Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 166, pp. 1-21, 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108456.
- [91] BioAge Group, "ZF and start-up Levant Power partnering on first fully active, regenerative suspension for automobiles". GreenCarCongress.com. <https://www.greencarcongress.com/2013/08/20130828-zflevant.html> (acceso jul. 15, 2020).
- [92] M. A. A. Abdelkareem, L. Xu, X. Jing, A. B. M. Eldaly, J. Zou y M. K. A. Ali, "Field measurements of the harvestable power potentiality of an off-road sport-utility vehicle", *Measurement*, vol. 179, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109381.
- [93] M. A. A. Abdelkareem et al., "Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes", *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 110, pp. 307-332, 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2018.03.009.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).