



# tecnología

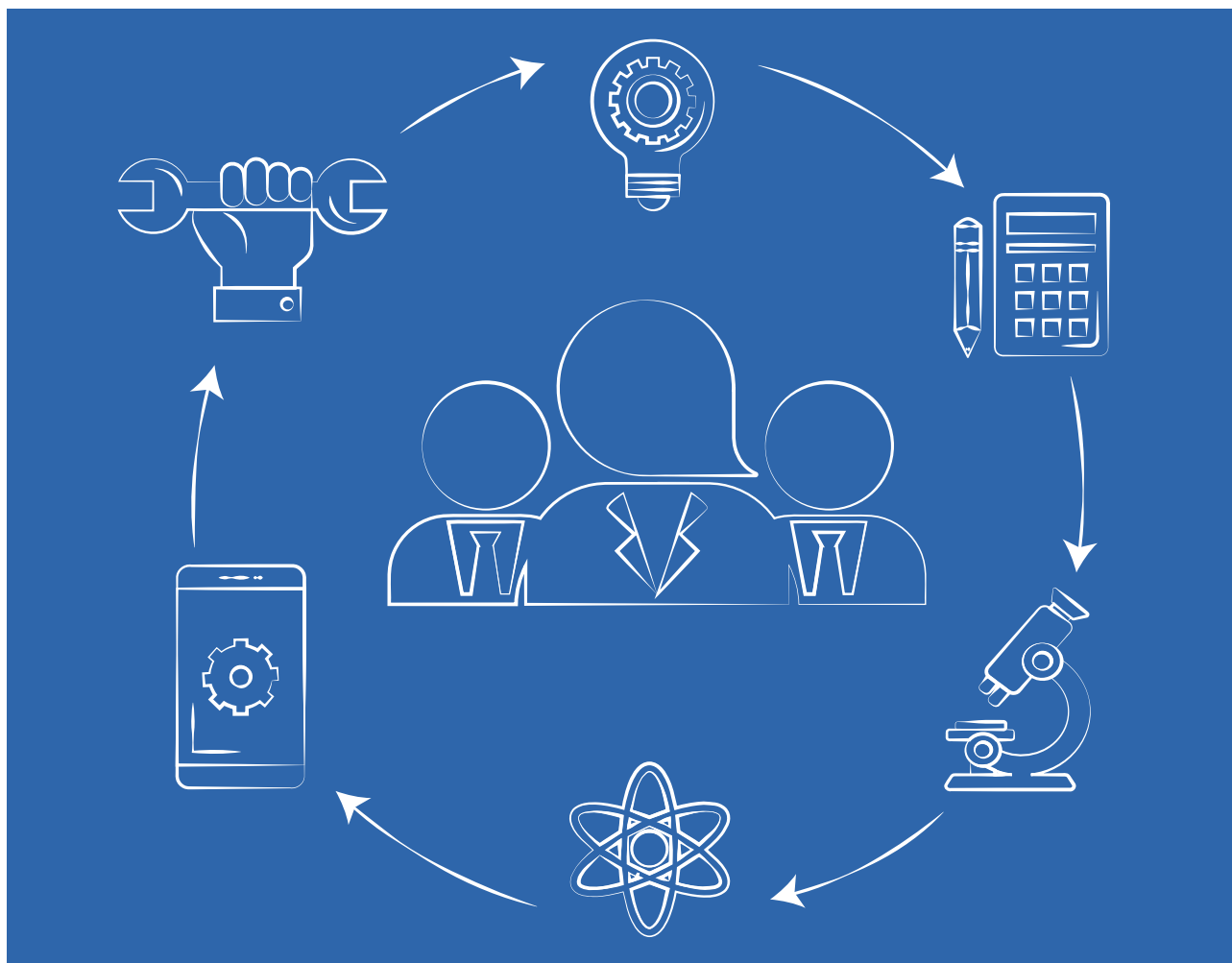
Glosas de innovación aplicadas a la pyme

Ed. 37\_Vol. 10\_N.º 1

Marzo\_Junio 2021

Publicación trimestral

ISSN: 2254 – 4143



### **3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme.**

Periodicidad trimestral. *Quarterly periodicity.*

Edición 37, Volumen 10, Número 1 (Marzo - Junio 2021).

*Edition 37, Volume 10, Issue 1 (March - June 2021).*

Tirada nacional e internacional. *National and internacional circulation.*

Artículos revisados por el método de evaluación de pares de doble ciego.

*Articles reviewed by the double blind peer evaluation method.*

ISSN: 2254 – 4143

Nº de Depósito Legal: A 268 – 2012

DOI: <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37>

Edita:

Área de Innovación y Desarrollo, S.L.

C/Alzamora 17, Alcoy, Alicante (España)

Tel: 965030572

[info@3ciencias.com](mailto:info@3ciencias.com) \_ [www.3ciencias.com](http://www.3ciencias.com)



Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos citando la fuente y el autor.

*This publication may be reproduced by mentioning the source and the authors.*

Copyright © Área de Innovación y Desarrollo, S.L.



## CONSEJO EDITORIAL EDITORIAL BOARD

---

Director	Víctor Gisbert Soler
Editores adjuntos	María J. Vilaplana Aparicio Maria Vela Garcia
Editores asociados	David Juárez Varón F. Javier Cárcel Carrasco

## CONSEJO DE REDACCIÓN DRAFTING BOARD

---

Dr. David Juárez Varón. *Universitat Politècnica de València (España)*  
Dra. Úrsula Faura Martínez. *Universidad de Murcia (España)*  
Dr. Martín León Santiesteban. *Universidad Autónoma de Occidente (México)*  
Dra. Inmaculada Bel Oms. *Universitat de València (España)*  
Dr. F. Javier Cárcel Carrasco. *Universitat Politècnica de València (España)*  
Dra. Ivonne Burguet Lago. *Universidad de las Ciencias Informáticas (La Habana, Cuba)*  
Dr. Alberto Rodríguez Rodríguez. *Universidad Estatal del Sur de Manabí (Ecuador)*

## CONSEJO ASESOR ADVISORY BOARD

---

Dra. Ana Isabel Pérez Molina. *Universitat Politècnica de València (España)*  
Dr. Julio C. Pino Tarragó. *Universidad Estatal del Sur de Manabí (Ecuador)*  
Dra. Irene Belmonte Martín. *Universidad Miguel Hernández (España)*  
Dr. Jorge Francisco Bernal Peralta. *Universidad de Tarapacá (Chile)*  
Dra. Mariana Alfaro Cendejas. *Instituto Tecnológico de Monterrey (México)*  
Dr. Roberth O. Zambrano Santos. *Instituto Tecnológico Superior de Portoviejo (Ecuador)*  
Dra. Nilda Delgado Yanes. *Universidad de las Ciencias Informáticas (La Habana, Cuba)*  
Dr. Sebastián Sánchez Castillo. *Universitat de València (España)*  
Dra. Sonia P. Ubillús Saltos. *Instituto Tecnológico Superior de Portoviejo (Ecuador)*  
Dr. Jorge Alejandro Silva Rodríguez de San Miguel. *Instituto Politécnico Nacional (México)*



## CONSEJO EDITORIAL EDITORIAL BOARD

---

Área financiera	Dr. Juan Ángel Lafuente Luengo <i>Universidad Jaime I (España)</i>
Área textil	Dr. Josep Valdeperas Morell <i>Universitat Politècnica de Catalunya (España)</i>
Ciencias de la Salud	Dra. Mar Arlandis Domingo <i>Hospital San Juan de Alicante (España)</i>
Derecho	Dra. María del Carmen Pastor Sempere <i>Universidad de Alicante (España)</i>
Economía y empresariales	Dr. José Joaquín García Gómez <i>Universidad de Almería (España)</i>
Estadística y Investigación operativa	Dra. Elena Pérez Bernabeu <i>Universitat Politècnica de València (España)</i>
Ingeniería y Tecnología	Dr. David Juárez Varón <i>Universitat Politècnica de València (España)</i>
Organización de empresas y RRHH	Dr. Francisco Llopis Vañó <i>Universidad de Alicante (España)</i>
Sinología	Dr. Gabriel Terol Rojo <i>Universitat de València (España)</i>
Sociología y Ciencias Políticas	Dr. Rodrigo Martínez Béjar <i>Universidad de Murcia (España)</i>
Tecnologías de la Información y la Comunicación	Dr. Manuel Llorca Alcón <i>Universitat Politècnica de València (España)</i>

# POLÍTICA EDITORIAL

## OBJETIVO EDITORIAL

---

La Editorial científica 3Ciencias pretende transmitir a la sociedad ideas y proyectos innovadores, plasmados, o bien en artículos originales sometidos a revisión por expertos, o bien en los libros publicados con la más alta calidad científica y técnica.

## COBERTURA TEMÁTICA

---

3C Tecnología es una revista de carácter científico-social en la que se difunden trabajos originales que abarcan la Arquitectura y los diferentes campos de la Ingeniería, como puede ser Ingeniería Mecánica, Industrial, Informática, Eléctrica, Agronómica, Naval, Física, Química, Civil, Electrónica, Forestal, Aeronáutica y de las Telecomunicaciones.

## NUESTRO PÚBLICO

---

- Personal investigador.
- Doctorandos.
- Profesores de universidad.
- Oficinas de transferencia de resultados de investigación (OTRI).
- Empresas que desarrollan labor investigadora y quieran publicar alguno de sus estudios.

# AIMS AND SCOPE

## PUBLISHING GOAL

---

3C Ciencias wants to transmit to society innovative projects and ideas. This goal is reached through the publication of original articles which are subject to peer review or through the publication of scientific books.

## THEMATIC COVERAGE

---

3C Tecnología is a scientific-social journal in which original works that cover Architecture and the different fields of Engineering are disseminated, such as Mechanical, Industrial, Computer, Electrical, Agronomic, Naval, Physics, Chemistry, Civil, Electronics, Forestry, Aeronautics and Telecommunications.

## OUR TARGET

---

- Research staff.
- PhD students.
- Professors.
- Research Results Transfer Office.
- Companies that develop research and want to publish some of their works.

# NORMAS DE PUBLICACIÓN

3C Tecnología es una revista arbitrada que utiliza el sistema de revisión por pares de doble ciego (*double-blind peer review*), donde expertos externos en la materia sobre la que trata un trabajo lo evalúan, siempre manteniendo el anonimato, tanto de los autores como de los revisores. La revista sigue las normas de publicación de la APA (American Psychological Association) para su indización en las principales bases de datos internacionales.

Cada número de la revista se edita en versión electrónica (e-ISSN: 2254 – 4143), identificándose cada trabajo con su respectivo código DOI (Digital Object Identifier System).

## PRESENTACIÓN TRABAJOS

---

Los artículos se presentarán en tipo de letra Baskerville, cuerpo 11, justificados y sin tabuladores. Han de tener formato Word. La extensión será de no más de 6.000 palabras de texto, incluidas referencias.

Los trabajos deben ser enviados exclusivamente por plataforma de gestión de manuscritos OJS:

<https://ojs.3ciencias.com/>

Toda la información, así como las plantillas a las que deben ceñirse los trabajos se encuentran en:

<https://www.3ciencias.com/revista/informacion-para-autores/>

<https://www.3ciencias.com/normas-de-publicacion/plantillas/>

# SUBMISSION GUIDELINES

3C Tecnología is an arbitrated journal that uses the double-blind peer review system, where external experts in the field on which a paper deals evaluate it, always maintaining the anonymity of both the authors and of the reviewers. The journal follows the standards of publication of the APA (American Psychological Association) for indexing in the main international databases.

Each issue of the journal is published in electronic version (e-ISSN: 2254 – 4143), each work being identified with its respective DOI (Digital Object Identifier System) code.

## PRESENTATION WORK

---

The papers will be presented in Baskerville typeface, body 11, justified and without tabs. They must have Word format. The extension will be no more than 6.000 words of text, including references. Papers must be submitted exclusively by OJS manuscript management platform:

<https://ojs.3ciencias.com/>

All the information, as well as the templates to which the works must adhere, can be found at:

<https://www.3ciencias.com/en/journals/infromation-for-authors/>

<https://www.3ciencias.com/en/regulations/templates/>

## ESTRUCTURA

---

Los trabajos originales tenderán a respetar la siguiente estructura: introducción, métodos, resultados, discusión/conclusiones, notas, agradecimientos y referencias bibliográficas.

Es obligatoria la inclusión de referencias, mientras que notas y agradecimientos son opcionales. Se valorará la correcta citación conforme a la 7.<sup>a</sup> edición de las normas APA.

## RESPONSABILIDADES ÉTICAS

---

No se acepta material previamente publicado (deben ser trabajos inéditos). En la lista de autores firmantes deben figurar única y exclusivamente aquellas personas que hayan contribuido intelectualmente (autoría), con un máximo de 4 autores por trabajo. No se aceptan artículos que no cumplan estrictamente las normas.

## INFORMACIÓN ESTADÍSTICA SOBRE TASAS DE ACEPTACIÓN E INTERNACIONALIZACIÓN

---

- Número de trabajos aceptados publicados: 5.
- Nivel de aceptación de manuscritos en este número: 45,5%.
- Nivel de rechazo de manuscritos: 54,5%.
- Internacionalización de autores: 5 países (México, Ecuador, España, India e Italia).

Normas de publicación: <https://www.3ciencias.com/normas-de-publicacion/instrucciones/>

## STRUCTURE

---

The original works will tend to respect the following structure: introduction, methods, results, discussion/ conclusions, notes, acknowledgments and bibliographical references.

The inclusion of references is mandatory, while notes and acknowledgments are optional. The correct citation will be assessed according to the 7th edition of the APA standards.

## ETHICAL RESPONSIBILITIES

---

Previously published material is not accepted (they must be unpublished works). The list of signatory authors should include only and exclusively those who have contributed intellectually (authorship), with a maximum of 4 authors per work. Articles that do not strictly comply with the standards are not accepted.

## STATISTICAL INFORMATION ON ACCEPTANCE AND INTERNATIONALIZATION FEES

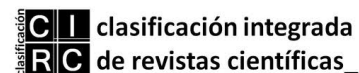
---

- Number of accepted papers published: 5.
- Level of acceptance of manuscripts in this number: 45,5%.
- Level of rejection of manuscripts: 54,5%.
- Internationalization of authors: 5 countries (Mexico, Ecuador, Spain, India and Italy).

Guidelines for authors: <https://www.3ciencias.com/en/regulations/instructions/>

## INDEXACIONES INDEXATIONS

---





## INDEXACIONES INDEXATIONS

---



# /SUMARIO/ /SUMMARY/

Apuntes de la energía fotovoltaica en México

*Notes on photovoltaic energy in Mexico*

Germán Martínez Prats, Francisca Silva Hernández, Mijael Altamirano Santiago y José Antonio Hernández Salinas

17

Declorinación de Bifenilos Policlorados (PCB) en aceites dieléctricos con hidróxido de calcio

*Dechlorination of Polychlorated Biphenyls (PCB) in dielectric oils by calcium hydroxide*

María Eugenia Martínez Herrera, Sergio Andrés Llorenty Macías, Shurguen Gustavo Pazos Galeas y Diego Iván Muñoz Naranjo

33

Metodología para el desarrollo de modelos de simulación ejecutables para sistemas de fabricación

*Methodology for the development of executable simulation models for manufacturing systems*

Sergio Benavent-Nácher, Fernando Romero Subirón y Pedro Rosado Castellano

49

Análisis del error humano y la calidad del producto en la industria de manufactura de dispositivos médicos. Estudio de caso

*Analysis of human error and product quality in the medical device manufacturing industry. Case study*

Teresa Carrillo-Gutiérrez, Rosa María Reyes-Martínez, Karina Cecilia Arredondo-Soto y Maria Marcela Solís-Quinteros

73

Implementation of Power-Efficient Control Unit on Ultra-scale FPGA for Green Communication

Bishwajeet Pandey, Keshav Kumar, Aiza Batool y Shabeer Ahmad

93

/01/

# APUNTES DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN MÉXICO

## NOTES ON PHOTOVOLTAIC ENERGY IN MEXICO

---

### **Germán Martínez Prats**

Profesor Investigador, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, (México).  
E-mail: [germanmtzprats@hotmail.com](mailto:germanmtzprats@hotmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6371-448X>

### **Francisca Silva Hernández**

Profesora Investigadora, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, (México).  
E-mail: [fany987@hotmail.com](mailto:fany987@hotmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-0002>

### **Mijael Altamirano Santiago**

Profesor Investigador, Instituto Politécnico Nacional, (México).  
E-mail: [xhuni@yahoo.es](mailto:xhuni@yahoo.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5194-2944>

### **José Antonio Hernández Salinas**

Maestro y Doctorando de la Universidad Autónoma del estado de México, (México).  
E-mail: [tonohsalinas@hotmail.com](mailto:tonohsalinas@hotmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-0002>

**Recepción:** 27/08/2020 **Aceptación:** 11/12/2020 **Publicación:** 15/03/2021

#### **Citación sugerida:**

Martínez, G., Silva, F., Altamirano, M., y Hernández, J. A. (2021). Apuntes de la energía fotovoltaica en México. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 17-31. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.17-31>

## RESUMEN

Ante una situación de crisis global en materia ambiental los mecanismos de asegurar el derecho a un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado resulta una labor constante, vista desde un proceso multidisciplinar e interdisciplinar, transversal e integral. El estado de riesgo y vulnerabilidad del ser vivo ha incentivado desde las diversas ciencias y disciplinas abocar temas emergentes y coyunturales como el medio ambiente. Derivado de ello, este documento pretende dar una descripción de apuntes respecto a la energía fotovoltaica en el estado mexicano como mecanismo de energía renovable. El sistema de energía fotovoltaica colabora con el cuidado del medio ambiente adquiriendo un valor sustancial en el sector económico y en el social como un sistema de apropiación que resulta con mayores ventajas de uso. El abanico de energía renovable en el estado mexicano a partir de la reforma energética considera la presencia de proveedores particulares de electricidad; así también otorgar a la ciudadanía, sector público y privado una gama de elección para proveerse de energía, reducción de emisión de carbono y eficiencia en la energía, todo lo anterior aun cuando deben afianzarse los mecanismos de aseguramiento de las mismas. Para comprender el abordaje de este tema se empleó una metodología cualitativa con alcance documental y enfoque explicativo y axiológico.

## PALABRAS CLAVE

Abastecimiento energético, Ambiente, Energía limpia, Sistema fotovoltaico.

## ABSTRACT

*Faced with a situation of global crisis in environmental matters, the mechanisms to ensure the right to a healthy and ecologically balanced environment is a constant task, seen from a multidisciplinary and interdisciplinary, transversal and comprehensive process. The state of risk and vulnerability of the living being has encouraged from the various sciences and disciplines to address emerging and conjunctural issues such as the environment. Derived from this, this document aims to provide a description of notes regarding photovoltaic energy in the Mexican state as a renewable energy mechanism. The photovoltaic energy system collaborates with the care of the environment, acquiring a substantial value in the economic and social sectors as an appropriation system that results in greater use advantages. The range of renewable energy in the Mexican state from the energy reform considers the presence of private electricity providers; as well as granting citizens, the public and private sectors a range of choice to provide themselves with energy, reduction of carbon emission and energy efficiency, all of the above, even though their assurance mechanisms must be strengthened. To understand the approach to this issue, a qualitative methodology with a documentary scope and an explanatory and axiological approach was used.*

## KEYWORDS

*Energy supply, Environment, Clean energy, Photovoltaic system.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Ante la emergencia de considerar esquemas de prevención, atención y mitigación en el medio ambiente el uso de energías renovables, pone en contexto al estado mexicano en atender desde diversas aristas esta situación compleja que procura a través de una generación y aplicación del conocimiento multidisciplinario, disponer de mecanismos a través de políticas públicas que fortalezcan la implementación o aseguramiento del uso de la energía renovable en el sector público y privado (De los Santos *et al.*, 2020).

A nivel mundial entre 2006 y 2011, la capacidad de producción global de energías renovables, incluyendo grandes hidroeléctricas, creció a tasas promedio anuales muy altas (entre 17% y 58%). La energía solar fotovoltaica registró el crecimiento más acelerado, con un aumento en la capacidad instalada de 58% anual promedio durante el período citado. Por primera vez, en 2011 la energía solar fotovoltaica representó la mayor cantidad de nueva capacidad eléctrica instalada en la Unión Europea, más que ninguna otra tecnología (SENER, 2012 p.27).

En México de acuerdo al Balance General de Energía 2018 (Secretaría de Energía, 2019) el desarrollo de centrales fotovoltaicas y generación distribuida permitió que la producción de energía a través de este recurso incrementara 58.2% respecto al año 2017.

Aunado a lo anterior, a través de la implementación y vista como un área de oportunidad de inversión el sistema fotovoltaico representa el impulso de la economía sustentable a un nivel local, regional y nacional. Fortaleciendo un sistema de aseguramiento a la sociedad y a la propia economía del país. Debido a que para la vivienda familiar representa una inversión a mediano y largo plazo en el que el gasto de energía no tenga un costo elevado. En el caso de las empresas beneficia un ahorro en el consumo energético que puede ser aprovechado de mejor manera.

En ese contexto el estado mexicano cuenta con un gran potencial en recursos energéticos renovables, el desarrollo de estos está permitiendo contar con una mayor diversificación de fuentes de energía, ampliar



y afianzar la industria con mayor impacto benéfico, asimismo permite mitigar el impacto ambiental originado por el uso de energía convencional.

La ingeniería sostenible orienta acciones concretas a partir del uso de las energías renovables en los diversos sectores como el industrial (Prats *et al.*, 2020); el sistema fotovoltaico es un punto central que por regiones se puede potencializar; México ha procedido a transformar los procesos de obtención, manejo y uso de energía convencional a energía renovable a través de las normas internas que legitimen este tipo de energía, con aras de un impacto progresivo en la economía, medio ambiente y legislación.

## 2. METODOLOGÍA

Con el interés de comprender, sistematizar y analizar (Altamirano y Martínez, 2011) lo concerniente al desarrollo del documento intitulado “Ingeniería sostenible a partir de inversiones en sistemas fotovoltaicos” se empleó una metodología cualitativa aplicando el método documental el cual implicó búsqueda y consulta en fuentes de información bibliohemerográficas.

El enfoque explicativo, apoyo en estudiar las razones o motivos (Silva, 2020a) que dieron origen en el fenómeno de la energía renovable en caso específico el sistema fotovoltaico en México. De igual forma el enfoque exegético permitió identificar la base jurídica que fortaleció la implementación y desarrollo del sistema energético sostenible en el estado mexicano.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

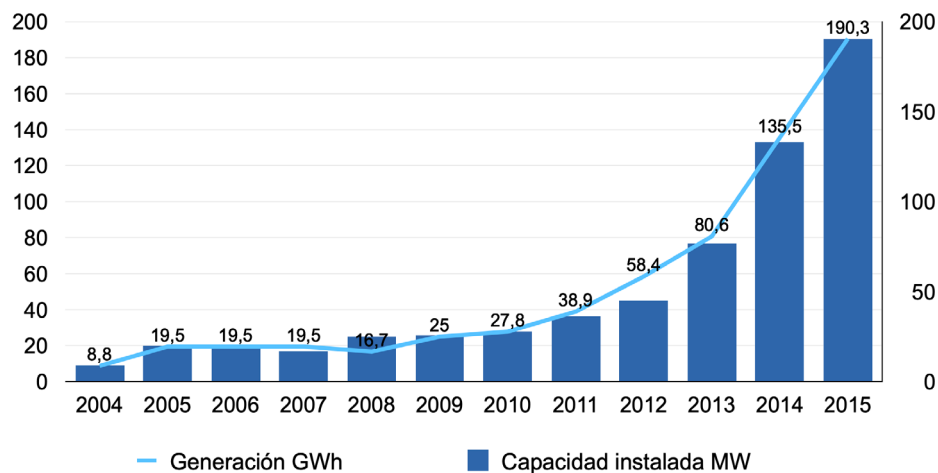
Una fuente de energía renovable es la energía solar y su energía puede aprovecharse al convertir la radiación electromagnética en calor o en electricidad mediante el efecto fotovoltaico (Laborde *et al.*, 2016).

La energía solar fotovoltaica es aquella que transforma la radiación solar en energía eléctrica por medio de la exposición al sol de celdas o paneles fotovoltaicos (López, Martínez, y Ruiz, 2017).

Un sistema fotovoltaico es un sistema con el que el usuario puede generar energía eléctrica para su consumo e inyección a la red; el dinero que se desembolsa en la adquisición del sistema se recupera a partir de la energía eléctrica ahorrada; el tiempo para recuperar la inversión depende del recurso solar y la legislación del país donde se instala (Bastida *et al.*, 2017).

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son paneles fotovoltaicos, inversor y medidor bidireccional; el panel fotovoltaico es el encargado de producir electricidad por medio de la exposición a los rayos solares; el inversor es el encargado de convertir la corriente continua en corriente alterna (el tipo de corriente utilizada en los hogares e industrias es la corriente alterna, los paneles producen corriente continua, es por ello que resulta necesario hacer la conversión) y el medidor bidireccional es el responsable de medir la energía consumida e inyectada a la red de distribución eléctrica (Ardila, Sanabria, y Hernández, 2015).

En ese sentido en México el aprovechamiento de energía solar ha ido en crecimiento a partir de este nuevo milenio, factores como la apertura y legislación en energía renovable ha permitido coadyuvar al mercado nacional y global el aprovechamiento de este recurso. El avance ha sido favorecedor en la ciencia y tecnología para el escenario mexicano (Altamirano, 2010). En la siguiente gráfica se expone la capacidad instalada y la generación de energía eléctrica fotovoltaica 2004-2015.



**Figura 1.** Capacidad instalada y generación bruta de centrales fotovoltaicas, 2004-2015.

**Fuente:** Reporte de Avance de Energías Limpias, SENER.

La capacidad instalada y la generación de energía eléctrica fotovoltaica se incrementaron en cuatro años (2011-2015) de 30 MW y 39 GWh/a a 170 MW y 190 GWh/a. El resultado de las subastas permite esperar que la capacidad en energía solar se triplique en los próximos tres años, al sumarse un total de 3,757 MW al cierre del 2018, resultado de las adiciones de capacidad de nuevas centrales, y los proyectos ganadores de la primera y segunda subastas, que contribuirán con 1,691 MW y 210 MW respectivamente. Adicionalmente, al cierre del 2019 se integrarán a la matriz energética 1,643 MW procedentes de la segunda subasta (Diario Oficial de la Federación, 2017).

En la siguiente tabla se describe el grado de avance porcentual de módulos fotovoltaicos en el periodo 2008-2018.

**Tabla 1.** Aprovechamiento de energía solar 2008-2018.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Calentadores solares planos</b>											
Instalados en dicho año (miles de m <sup>2</sup> ):	165.63	233.34	272.58	272.32	272.32	292.94	308.65	356.32	381.13	397.83	397.83
<b>Total instalados (miles de m<sup>2</sup>):</b>	<b>1159.59</b>	<b>1392.92</b>	<b>1665.50</b>	<b>1937.82</b>	<b>2208.18</b>	<b>2501.12</b>	<b>2809.77</b>	<b>3166.09</b>	<b>3547.22</b>	<b>3945.05</b>	<b>3945.05</b>
Eficiencia promedio <sup>1</sup> :	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Radiación solar promedio (kJ/m <sup>2</sup> -día):	21132	21132	21132	21132	21132	21132	21132	21132	21132	21132	21132
Disponibilidad de calor solar primario (PJ):	8.97	10.74	12.85	14.95	17.08	19.29	21.97	24.42	27.36	30.43	33.68
Generación (PJ):	3.27	4.01	4.86	5.66	6.43	7.24	8.06	9.09	10.18	11.32	12.53
<b>Módulos fotovoltaicos</b>											
Capacidad instalada en dicho año (kW):	872.40	5,712.00	3,502.00	10,400.00	20,900.00	22,280.00	33,970.00	42,637.26	39,730.21	46,421.85	53,170.53
<b>Total capacidad instalada (kW):</b>	<b>19,406.40</b>	<b>25,118.00</b>	<b>28,620.00</b>	<b>39,020.00</b>	<b>59,920.00</b>	<b>82,200.00</b>	<b>1161,170.00</b>	<b>158,807.26</b>	<b>198,537.47</b>	<b>244,959.32</b>	<b>298,129.85</b>
Horas promedio de insolación (h/día):	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80
Proporción de sistemas interconectados <sup>2</sup> :	0.02	0.02	0.19	0.24	0.43	0.64	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Factor de planta <sup>3</sup> :	13.5%	13.5%	14.1%	14.4%	15.1%	16.0%	17.0%	17.0%	17.0%	17.0%	17.0%

Rendimiento promedio por año:	0.67	0.67	0.71	0.72	0.76	0.80	0.85	0.85	0.85	0.85	1.85
Generación (PJ):	0.06	0.09	0.10	0.14	0.21	0.29	0.37	0.47	0.59	0.73	0.89

Fuente: SENER, 2019.

En un periodo de diez años en México los módulos fotovoltaicos pasaron de 872.40 a 53,170.53 de capacidad instalada en año (KW). Al ser de interés en el sector público y privado, actualmente se puede distinguir que la inversión en este tipo de energía está siendo implementada a través de concursos de desarrollo económico en las oficinas gubernamentales, industria, comercio y servicio.

El uso de sistemas fotovoltaicos se ha incrementado en diversos países y la industria ha trabajado a nivel mundial en formas de reducir el costo en los equipos y de mantener una tendencia a la baja en este rubro, sin embargo, actualmente instalar este tipo de tecnologías siguen siendo altos a comparación de fuentes convencionales y en muchos casos dependen de la aplicación de los incentivos fiscales (Martínez y Chávez, 2020) modestos otorgados por los gobiernos (Ferreira *et al.*, 2018). Los beneficios de la instalación de sistemas fotovoltaicos explica el autor Awerbuch, (2000) son la reducción en el costo de la factura energética, baja dependencia energética del país, incremento en la eficiencia energética y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>; así mismo, los resultados de la investigación de los autores Robles et al. (2016) para el sector alimenticio concluyen que en el uso de energías de fuente renovable se obtienen 3 tipos de beneficios: 1) económicos: al reducir los costos y el retorno de la inversión en un mediano plazo, 2) sociales: al mejorar la imagen y aceptación de la empresa y 3) ambientales: al reducir las emisiones por uso de combustibles fósiles.

A pesar de los beneficios mencionados anteriormente, la falta de información o conocimiento, el alto costo en la inversión inicial, la falta de recursos financieros y periodos largos de retorno de inversión son barreras que inhiben la instalación de este tipo de tecnologías en las empresas (Horváth y Szabó, 2018) y es por ello por lo que en muchos casos se tiene incertidumbre si se debe realizar este tipo de inversión.

### 3.2. LEGISLACIÓN EN MÉXICO EN MATERIA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Ante los cambios suscitados a nivel global por la crisis de cambio climático los países han tenido que considerar procesos transformativos que coadyuven a la prevención en cuanto a riesgo y vulnerabilidad en los diversos sectores. En el caso del estado mexicano en el año 2011 se elevan a rango Constitucional los derechos humanos.

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el artículo cuarto se prevé el derecho humano al medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado, lo que concierne a establecer una normativa referente al medio ambiente en cuanto al manejo, uso, prevención, sanción por acción u omisión en los recursos naturales de la jurisdicción del estado mexicano.

Como acción de mitigación (Silva, 2020b) por energía convencional la energía renovable se ha legislado en México, a partir de una fuente de aprovechamiento e incentivo para su uso y empleo, como se describe en los siguientes párrafos.

En 2004, se emite un apartado en la Ley del Impuesto sobre la Renta con el que se fomenta el uso de energía por fuentes renovables el cual permite que las personas morales se puedan deducir el 100% del costo de un sistema fotovoltaico.

En 2008, se publica en el Diario Oficial de la Federación, la ley para el aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE); en este mismo año también se publica la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE) y para el año siguiente se publican los reglamentos respectivos (Sánchez *et al.*, 2017).

Para el 2012, a través de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) se establecen las reglas de interconexión al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para los generadores o permisionarios con fuentes de energía (Sánchez y Martínez, 2017).

Para 2014 con la Reforma Energética, se crea el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en donde se permite a la iniciativa privada tener participación en la generación de electricidad y así mismo ofertarla en el mercado (Martínez, Santillan, y de la Vega, 2016).

Con la emisión de estas leyes, el gobierno ha podido impulsar la elaboración e implementación de diversos estudios y proyectos demostrativos interconectados a la red tanto para particulares como para el gobierno (Sánchez y Martínez, 2017).

## 4. CONCLUSIONES

La energía renovable vista desde el proceso de la ingeniería sostenible y aprovechada a través del sistema fotovoltaico considera elementos dentro del mercado como la productividad entendiendo esta como aquella que se utiliza de forma eficiente, al aumentar la capacidad de producción o con el uso de energías renovables; es un elemento estratégico en donde los se alcanzan niveles de competitividad necesarios en las industrias (Martínez *et al.*, 2019); para la optimización de la productividad es necesario incrementar la eficacia y eficiencia con la que se utilizan los recursos humanos, capital, materiales y financieros. La rentabilidad como el aprovechamiento de economías de escala, mejor nivel de negociación frente a proveedores o clientes; estas características son un reflejo de la creación de ventajas competitivas.

En un contexto de formación, las instituciones educativas han integrado a su oferta académica programas de estudios orientados a formar y generar profesionales y especialistas en energía renovable. Asimismo, instituciones como el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología ha apostado en la generación y aplicación del conocimiento en proyectos, programas educativos de posgrado, equipo e infraestructura en lo que concierne a la energía renovable.

Finalmente es importante reconocer el marco legal consolidado en legitimar de forma sostenible, integral y transversal la energía renovable. En ese sentido se subraya que se debe considerar ahondar en

investigaciones y formación multidisciplinario que permita de forma sustantiva fortalecer lo concerniente a la energía renovable.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altamirano, M., y Martínez, A.** (2011). El método comparado y el neo-constitucionalismo como marco metodológico para la investigación en las Ciencias Sociales. *Mundo siglo XXI, revista del CIECAS-IPN*, 25, 55-63. <https://www.mundosisigloxxi.ipn.mx/pdf/v07/25/05.pdf>
- Altamirano, M.** (2010). Ciencia y tecnología: México desde una perspectiva comparada. En Mario Sánchez Silva (coord.) *Economía del conocimiento y globalización*. CIECAS-IPN.
- Ardila, A., Sanabria, J., y Hernández, J.** (2015). *Metodología de dimensionamiento de un sistema de respaldo energético basado en tecnología fotovoltaica*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. <https://doi.org/10.14483/22487638.9610>
- Awerbuch, S.** (2000). *Investing in photovoltaics: risk, accounting and the value of new technology*. Energy Policy.
- De los Santos, L., Guzmán, C., y Martínez, G.** (2020). Microcréditos, financiamiento alternativo en PYMES mexicanas: revisión de evidencia reciente. *Revista especializada en Ciencia, tecnología e ingeniería*, 14(1), 1-17. <https://doi.org/10.22490/25394088.4056>
- Diario Oficial de la Federación.** (2017). *Acuerdo por el que la Secretaría de Energía emite el Programa Especial de la Transición Energética*. SENER.
- Ferreira, A. K.-A., Khun, S. S., Fagnani, K. C., De Souza, T. A., Tonezer, C., Rodrigues, G., y Coimbra-Araújo, C. H.** (2018). Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 1), 181-191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>



- Horváth, D., y Szabó, R.** (2018). Evolution of photovoltaic business models: Overcoming the main barriers of distributed energy deployment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 623-635. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.101>
- Laborde, M., y Williams, R.** (2016). *Energía Solar*. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- López, R., Martínez, J., y Ruiz, R.** (2017). Análisis de viabilidad y gestión del riego en invernaderos mediterráneos con energía solar fotovoltaica. *Revista Iberoamericana del Agua*, 47(2). <https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1332806>
- Martínez, G., y Chávez, S.** (2020). Beneficios contables y fiscales de los contribuyentes de negocios plataneros en México. *Revista Perspectiva Empresarial*, 7(1), 61-71. <https://doi.org/10.16967/23898186.628>
- Martínez, G., Ruiz, H. A., y Mapen, F. de J.** (2019). Emprendimiento y competitividad internacional en México. *3C Empresa. Investigación y pensamiento crítico*, 8(2), 108-121. <http://dx.doi.org/10.17993/3cemp.2019.080238.108-121>
- Martínez, F., Santillan, M., y de la Vega, Á.** (2016). La reforma energética de 2013/2014. *Análisis Económico*, 31(78), 7-32. <http://www.economia.unam.mx/profesores/angelv/publicaciones/EnerReform&IndustrPUBL.pdf>
- Prats, G., Álvarez, Y., Hernández, F., y Zamora, D.** (2020). Environmental Taxes. Its Influence on Solid Waste in Mexico. *Journal Of Environmental Management And Tourism*, 11(3), 755-762. [https://doi.org/10.14505/jemtv11.3\(43\).29](https://doi.org/10.14505/jemtv11.3(43).29)
- Robles, M., Torres, Z., y Robles, M.** (2016). Impacto en las organizaciones del sector alimentos en México por el uso y consumo de energías renovables. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 9(27), 20. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6498580>

- Saiz, J., Bastida, P., Molina, M., y Álvarez, B.** (2017). Instalaciones solares fotovoltaicas de autoconsumo para pequeñas instalaciones. Aplicación a una nave industrial. *3C Tecnología. Glosas De Innovación Aplicadas a La Pyme*, 6(1), 14. <https://ojs.3ciencias.com/index.php/3c-tecnologia/article/view/1>
- Sánchez, A., y Martínez, D.** (2017). *Aplicaciones Fotovoltaicas de la Energía Solar en los Sectores Residencial, Servicio e Industrial*. UNAM.
- Silva, F.** (2020a). Análisis del alcance e implicaciones del patrimonio de los archivos en México, para la investigación social. *Revista San Gregorio*, 1(39), 74-86. <http://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/1377>
- Silva, F.** (2020b). Desplazamiento forzado interno en México. Aspectos legales y ausencia presupuesto. *Telos: revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales*, 22(3), 626-638. <https://doi.org/10.36390/telos223.11>
- Secretaría de Energía.** (2019). *Balance General de Energía 2018*. SENER. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf)
- Secretaría de Energía.** (2012). *Prospectivas de energías renovables 2012-2026*. SENER. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2012-2026.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf)



/02/

# DECLORINACIÓN DE BIFENILOS POLICLORADOS (PCB) EN ACEITES DIELECTRICOS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO

## DECHOLORINATION OF POLYCHLORATED BIPHENYLS (PCB) IN DIELECTRIC OILS BY CALCIUM HYDROXIDE

---

**María Eugenia Martínez Herrera**

Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador, (Ecuador).

E-mail: [ma.eugenia97@gmail.com](mailto:ma.eugenia97@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3728-3556>

**Sergio Andrés Llorenty Macías**

Ingeniería Ambiental, Universidad Agraria del Ecuador, (Ecuador).

E-mail: [sergiollorenty@gmail.com](mailto:sergiollorenty@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9867-4251>

**Shurguen Gustavo Pazos Galeas**

Medicina Familiar, Sociedad Ecuatoriana de Medicina Familiar – FL., (Ecuador).

E-mail: [mdbpazos.cs5@gmail.com](mailto:mdbpazos.cs5@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7360-0937>

**Diego Iván Muñoz Naranjo**

Docente, Universidad Agraria del Ecuador, (Ecuador).

E-mail: [dmunoz@uagraria.edu.ec](mailto:dmunoz@uagraria.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2203-0588>

**Recepción:** 02/09/2020 **Aceptación:** 21/12/2020 **Publicación:** 15/03/2021

### Citación sugerida:

Martínez, M. E., Llorenty, S. A., Pazos, S. G., y Muñoz, D. I. (2021). Declorinación de Bifenilos Policlorados (PCB) en aceites dieléctricos con hidróxido de calcio. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 33-47. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.33-47>

## RESUMEN

El estudio demuestra la eficiencia del tratamiento de declorinación para reducir los niveles de Bifenilos Policlorados (PCB) en los aceites dieléctricos utilizados en los transformadores más antiguos de una subestación eléctrica ubicada en la provincia de Los Ríos. El proceso abarca la gestión del muestreo, análisis de laboratorio, experimentación y análisis de eficiencia del tratamiento. En el muestreo, se obtuvieron 10 muestras de aceites dieléctricos. En la fase de análisis, las muestras fueron enviadas a un laboratorio acreditado para que se realice una cromatografía de gases en la que se corroboró que solo 3 muestras tenían cantidades superiores a 50 ppm de PCB. Para la parte experimental, se tomó en consideración los siguientes tratamientos  $T_1: \frac{0,5g}{3mL}$ ,  $T_2: \frac{1g}{3mL}$  y  $T_3: \frac{3g}{3mL}$  para la reducción de concentración de PCB junto al etanol, el cual actúa como catalizador en la reacción. Para cada ensayo, se realizaron 5 repeticiones para validar el proceso. Con lo cual se demostró que los 3 tratamientos redujeron concentraciones significativas del PCB, catalogando al tratamiento con mayor eficiencia al #2 obteniendo una efectividad del 78,74%.

## PALABRAS CLAVE

Aceites Dieléctricos, Bifenilos Policlorados, Declorinación, Hidróxido de Calcio, Reducción.

## ABSTRACT

*The study demonstrates the efficiency of the dechlorination treatment to reduce the levels of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in dielectric oils used in the oldest transformers of an electrical substation located in the province of Los Ríos, Ecuador. The process includes sampling, laboratory analysis, experimentation, and analysis. Through a sampling, 10 dielectric oil samples were obtained from the electrical substation. In the quantitative characterization, the samples were sent to an accredited laboratory for gas chromatography to be carried out, which confirmed that only 3 samples had amounts greater than 50 ppm of PCBs. For the experimental part, the following treatments were taken into consideration:  $T_1$ :  $\frac{0,5\text{ g}}{3\text{ mL}}$ ,  $T_2$ :  $\frac{1\text{ g}}{3\text{ mL}}$  and  $T_3$ :  $\frac{3\text{ g}}{3\text{ mL}}$  for concentration reduction of PCB together with ethanol, which acts as a catalyst in the reaction. For each test, 5 repetitions were performed to validate the process. The 3 proposed treatments reduced significant concentrations of PCB, claiming that the treatment with greater efficiency was #2, obtaining an effectiveness of 78.74%.*

## KEYWORDS

*Calcium Hydroxide, Dechlorination, Dielectric Oils, Polychlorinated Biphenyls, Reduction.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los Bifenilos Policlorados (PCB) son compuestos sintéticos que se encuentran entre los contaminantes más tóxicos. En 1881, fueron sintetizados por Schmitt-Schulz, de nacionalidad alemana. Desde 1920, los PCB fueron usados con fines industriales, como fluidos de aislamiento e intercambio de calor en el sector eléctrico. La producción de los PCB a nivel industrial despegó por parte de la compañía Monsanto en 1929. La producción mundial de PCB en el período de 1930-1993 fue de 1,324 millones de toneladas. En 1965, iniciaron las preocupaciones cuando se detectaron trazas de PCB en la vida silvestre en Suecia. Más tarde, en 1979, tras la identificación de PCB en muestras ambientales, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) prohibió la fabricación de PCB y comenzó a regular estrictamente el uso de PCB en la industria (Tanabe, 1988).

Sin embargo, varios países europeos y asiáticos continuaron con su producción hasta principios de 1980. Actualmente, la elaboración de PCB se limita a pequeñas cantidades para fines de investigación. A pesar de que el producto ya no se es fabricado, sigue presente en muchos equipos como capacitadores y transformadores eléctricos antiguos (Erickson y Kaley, 2011).

En 1982, de la producción total, 48 mil toneladas fueron destruidas y 780 mil toneladas seguían en uso, almacenados o en rellenos. Se estima que 10E7 kg de PCB están dispersos en la atmósfera, biosfera e hidrósfera, incluso en los componentes lipoidales de plantas y animales, lo que representa una amenaza para todas las criaturas vivientes (Robinson y Lenn, 1994; Tapia *et al.*, 2015).

Varios países de Latinoamérica cuentan con un inventario de aceites contaminados con PCB. Brasil tiene 80.000 toneladas de aceites contaminados. Seguido por Colombia, el cual estima valores aproximados de 10.073 a 13.199 toneladas de PCB. Después, Perú con un aproximado de 10.083 de toneladas potencialmente contaminadas. Luego, Venezuela que posee 6.500 a 10.000 toneladas de PCB. Por último, Uruguay reporta existencias de apenas 4.150 toneladas de PCB (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007; Tapia *et al.*, 2015).



En Ecuador se realizó un informe en el año 2003, denominado “Inventario Preliminar de Bifenilos Policlorados (PCB)”, en el cual se determinó 5’472,805 litros de aceites dieléctricos contaminados con PCB (>50 ppm) catalogados como pasivos ambientales por las empresas eléctricas. Ecuador es parte del Convenio de Estocolmo desde Junio del 2004. Dicho convenio concede a los países suscritos un plazo hasta el 2025 para tratar y eliminar los PCB (Salgado, 2017; Tapia *et al.*, 2015).

## 2. METODOLOGÍA

En el proyecto se plantea el procedimiento para la disminución de la concentración de PCB en los aceites dieléctricos. Al aceite de transformador que contiene PCB se le agregaron distintas dosis de hidróxido de calcio, junto al etanol, mientras se agita a temperatura ambiente. El tiempo que dura la reacción es de 24 horas. Se realizaron 3 tratamientos con variaciones de dosis de hidróxido de calcio, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tratamientos para la remoción de PCB.

TRATAMIENTO	AGENTE DECLORANTE	DOSIS (g)	CATALIZADOR	DOSIS (mL)
1	Hidróxido de calcio	Agente declorante	Etanol 96%	10:3
2		Agente declorante		10:3
3		Agente declorante		10:3

**Fuente:** elaboración propia.

La dosis del hidróxido de calcio (g) y etanol (ml) señaladas están en relación con el volumen de aceite dieléctrico (ml) utilizado para tratar.

## 3. RESULTADOS

Para la caracterización de datos, se muestrearon aleatoriamente 10 transformadores para la obtención de la mayor cantidad de aceites contaminados.

Sin embargo, de los 10 muestreos solo 3 contaban con las características para la continuación del proyecto (ver Tabla 2).

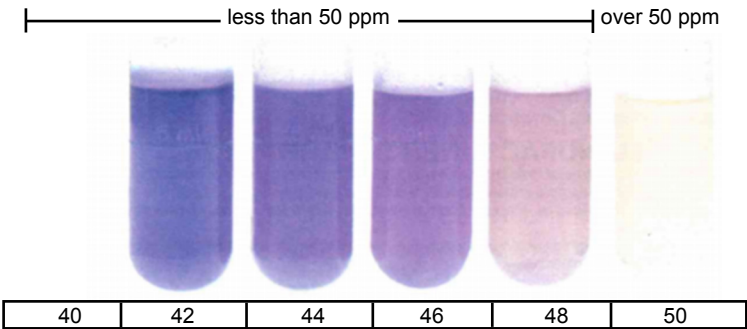
**Tabla 2.** Resultados de análisis de muestras.

MUESTRA	CONCENTRACIÓN (PPM)	OBSERVACIÓN
1	19,45	No aplicable
2	14,72	No aplicable
3	195,71	Aplicable
4	207,86	Aplicable
5	38,07	No aplicable
6	27,18	No aplicable
7	28,16	No aplicable
8	10	No aplicable
9	16,69	No aplicable
10	190,22	Aplicable

**Fuente:** elaboración propia.

Por medio de este muestreo no se pudo conocer el estado general de la subestación eléctrica con respecto al contenido de PCB en sus transformadores, ya que los análisis mediante cromatografía de gases suponen gastos elevados y se estableció que el límite máximo de selección de muestras como 10.

Debido a que el análisis del Kit Clor-n-Oil es colorimétrico, se realizó una clasificación otorgándole un valor a cada color para la obtención de datos cuantitativos y facilitar la interpretación de datos. Tomando en consideración la teoría de que mientras más oscuro sea el color, menor cantidad de PCBs existen en la muestra se definieron los siguientes valores (ver Figura 1).

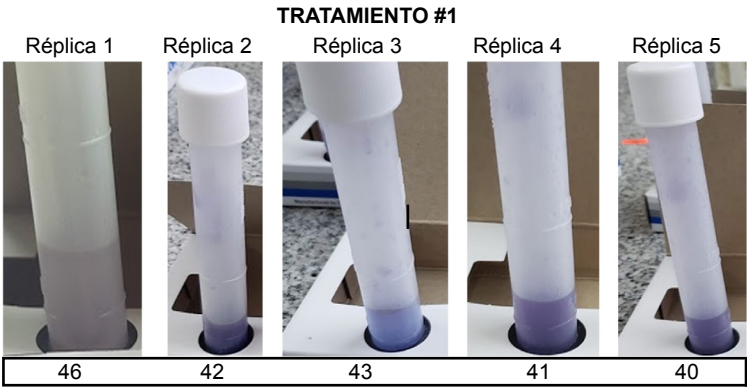


**Figura 1.** Clasificación colorimétrica de kit Clor-n-Oil.

**Fuente:** elaboración propia.

En la experimentación se trabajó con 3 valores constantes para los tratamientos, los cuales son la cantidad de etanol equivalente a 10 ml, el cual sirve como catalizador y su única función es disminuir los tiempos de duración de los tratamientos, la cantidad del aceite dieléctrico contaminado a remediar establecida como 3 ml y el tiempo de reacción se determinó como 24 horas.

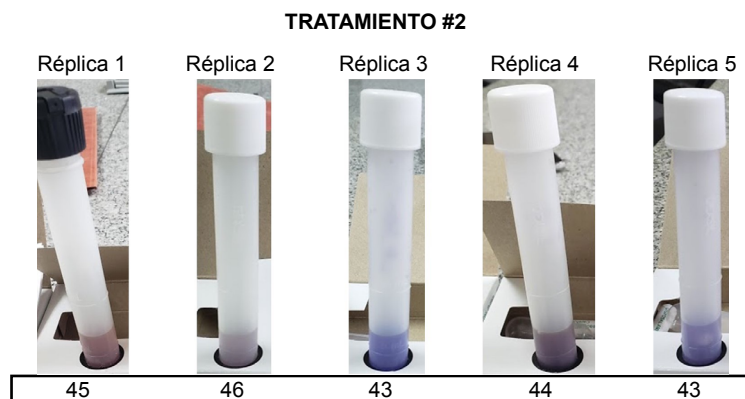
En el primer tratamiento se utilizó una cantidad de 0,5 gramos de hidróxido de calcio, consiguiendo los siguientes resultados (ver Figura 2).



**Figura 2.** Resultados del tratamiento #1.

**Fuente:** elaboración propia.

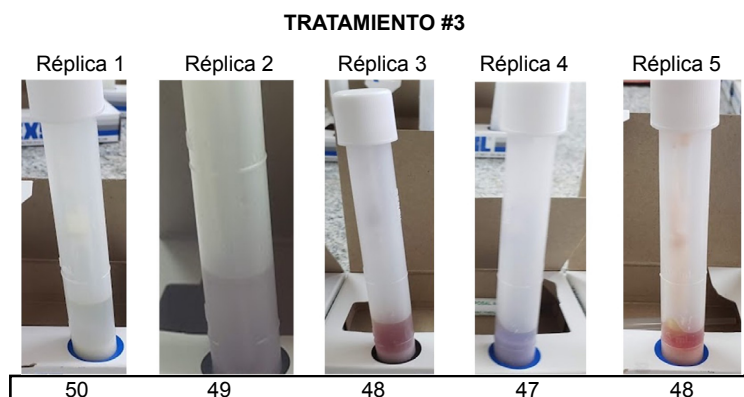
Para el segundo tratamiento, se usó una dosificación de 1 gramo de hidróxido de calcio, en el cual se obtuvieron las reacciones que se pueden apreciar posteriormente (ver Figura 3).



**Figura 3.** Resultados del tratamiento #2.

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, en el tercer tratamiento la cantidad de hidróxido de calcio aumentó a 3 gramos y su efecto en 24 horas se aprecia a continuación (ver Figura 4).



**Figura 4.** Resultados del tratamiento #3.

**Fuente:** elaboración propia.

### 3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una vez obtenidos los datos de la experimentación de los tres tratamientos, estos son analizados para definir si provienen de una distribución normal.

Definiendo de esta manera las hipótesis:

$H_0: P > 0.05$ : Los datos presentan una distribución normal.

$H_A: P < 0.05$ : Los datos no presentan una distribución normal.

Pruebas de normalidad			
	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	P
T1	,943	5	,685
T2	,902	5	,421
T3	,961	5	,814

**Figura 5.** Prueba de Normalidad.

**Fuente:** elaboración propia.

A través de un análisis realizado por el software SPSS, se determinó que en el primer, segundo y tercer tratamiento se comprueba que  $P > 0.05$ , por lo que se acepta la hipótesis nula que establece que los datos presentan una distribución normal.

Debido a la normalidad de los datos, se procede a la ejecución de la prueba T de Student (ver Figura 6).

Prueba de muestras emparejadas								
	Diferencias emparejadas					t	gl	P
	Media	Desviación estándar	Media de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Muestra 1	153,31000	2,30217	1,02956	150,45147	156,16853	148,908	4	,000
Muestra 2	163,66000	1,30384	,58310	162,04107	165,27893	280,675	4	,000
Muestra 3	141,82000	1,14018	,50990	140,40429	143,23571	278,132	4	,000

**Figura 6.** Prueba T de Student.**Fuente:** elaboración propia.

Para analizar las hipótesis planteadas, se comprobó que  $P < 0.05$ , para los tres tratamientos. Por lo que, por medio de este análisis aceptamos la hipótesis alternativa que indica lo siguiente:

El hidróxido de calcio remueve PCB de los aceites dieléctricos.

Una vez aceptada la validez de los tres tratamientos planteados, se procede a la selección de la dosis más eficiente. Esta selección se hace por medio de la selección del tratamiento con mayor porcentaje de reducción en la concentración de PCB. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%r = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100$$

Donde:

%r= Porcentaje de reducción

Ci= Concentración inicial

Cf= Concentración final

Para esta ecuación se utilizaron los datos de la Tabla 3.

**Tabla 3.** Porcentaje de reducción de tratamientos.

# TRATAMIENTO	PORCENTAJE DE REDUCCIÓN
1	78,34%
2	78,74%
3	74,56%

**Fuente:** elaboración propia.

Los tratamientos planteados redujeron más del 70% de contaminantes en los aceites dieléctricos. El proceso #1 y #2 tuvieron un resultado similar, sin embargo, el tratamiento #2 se considera más eficiente. De esta manera, se determina que la dosis de los tratamientos propuestos de hidróxido de calcio para la remoción de PCB en 3 ml de aceites dieléctricos mediante el método de deshalogenación química es de 1 gramo.

## 4. CONCLUSIONES

Los transformadores y condensadores son los mayores reservorios de PCB que aún están en uso hoy en día. Los aceites dieléctricos obtenidos del muestreo indican una presencia de bifenilos policlorados (PCB) en todos los transformadores elegidos. Sin embargo, sólo 3 se encontraban con concentraciones superiores a 50 ppm (ver Figura 3). Este análisis se realizó a través del método ASTM D4059-00-2010, autores como Lopera y Aguirre (2006) concuerdan con que es una técnica precisa en sus resultados. Así mismo Corbella, Rodríguez-Delgado y García (1998) señalan que la precisión de la determinación de PCB es crítica para evaluar contaminación por compuestos de Aroclor. Desafortunadamente, la determinación rigurosa de todos los componentes es extremadamente costosa y consume mucho tiempo.

La deshalogenación química realizada alcanzó porcentajes de reducción de PCB superiores al 70% (ver Tabla 3), tomando en cuenta la clasificación cuantitativa que se efectuó con respecto al kit Clor-n-Oil (ver Figura 4). A pesar de que no se cuenta con datos cuantitativos exactos, se supone la efectividad de los tratamientos propuestos.

La reducción significativa de PCB en aceites dieléctricos cumple con lo establecido por Hawari (1990) cuando realizó un proceso para la deshalogenación con 2 gramos de calcio en un alcohol inferior y obteniendo así que cerca del 99% de PCB había desaparecido. De esta misma manera, estos datos concuerdan con la remoción realizada por Mitoma en dos estudios utilizando una dosis de 0.8 gramos de calcio metálico como reactivo y etanol como catalizador en un período de 24 horas. En su primer estudio, Mitoma (2001) usó calcio metálico en etanol obteniendo un residuo de PCB en la mezcla de reacción inferior al 0,04%. Mientras que en su segunda publicación sobre la decloración de policlorodibenzodioxinas (PCDD), policlorodibenzofuranos (PCDF) y PCB (2004), la eficiencia de la alcanzó más del 99%.

Para la remoción de PCB en aceites dieléctricos se emplearon tres tratamientos para reducir la mayor proporción de concentración de estos compuestos, es así como en el presente trabajo se utilizaron las dosis de 0.5, 1 y 3 gramos de hidróxido de calcio. La efectividad de los tratamientos planteados se ve relacionada con la duración de estos, ya que en 24 horas se alcanzó la eliminación de más del 50% de PCB.

Sin embargo, al igual que Jones et al. (2003), existen factores fundamentales que impiden la remoción de estos contaminantes. En primer lugar, los costos de eliminación son muy elevados por los diferentes costos de reactivos y energía que se necesitan para remover estos componentes. En segundo lugar, a pesar de que existen requisitos reglamentarios, no se ofrecen incentivos para la eliminación de PCB para agilizar el proceso.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Corbella, R., Rodríguez-Delgado, M. A., y García, F. J.** (1998). Contribution to the Identification and Quantitation of Aroclor Mixtures by Least-Squares Analysis of Gas Chromatographic Data. *Journal of Chromatographic Science*, 36, 7.
- Erickson, M. D., y Kaley, R. G.** (2011). Applications of polychlorinated biphenyls. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(2), 135-151. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0392-1>
- Hawari, J. A., St-Laurent, V., y Samson, R.** (1990). *Polyhaloaromatics with Sodium or Calcium in a Lower Alcohol* (Patent N.º 5,185,488). <https://patents.google.com/>
- Jones, C. G., Silverman, J., Al-Sheikhly, M., Neta, P., y Poster, D. L.** (2003). Dechlorination of Polychlorinated Biphenyls in Industrial Transformer Oil by Radiolytic and Photolytic Methods. *Environmental Science & Technology*, 37(24), 5773-5777. <https://doi.org/10.1021/es030412i>
- Lopera, E., y Aguirre, J.** (2006). Purificación de Aceites Aislantes Contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB's). *DIANA*, 73(150), 75-88.
- Mitoma, Y., Nagashima, S., Simion, C., Simion, A. M., Yamada, T., Mimura, K., Ishimoto, K., y Tashiro, M.** (2001). Dehalogenation of Aromatic Halides Using Metallic Calcium in Ethanol. *Environmental Science & Technology*, 35(20), 4145-4148. <https://doi.org/10.1021/es010716+>
- Robinson, G. K., y Lenn, M. J.** (1994). The Bioremediation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Problems and Perspectives. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 12(1), 139-188. <https://doi.org/10.1080/02648725.1994.10647911>
- Salgado, L.** (2017). *Documento de Sistematización y Lecciones Aprendidas del Proyecto Gestión Integrada Ambientalmente Racional de Bifenilos Policlorados*. Ministerio del Ambiente. <https://info.undp.org>
- Tanabe, S.** (1988). PCB problems in the future: Foresight from current knowledge. *Environmental Pollution*, 50, 5-28. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90183-2](https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90183-2)

**Tapia, L., Carrera, P., y Rodas, M.** (2015). *Guía Técnica para la Gestión Ambientalmente Racional de PCB*. Ministerio del Ambiente. <https://info.undp.org>

**Ministerio del Ambiente.** (2018, 5 de enero). *92,5 toneladas de aceite dieléctrico provenientes de las empresas del sector eléctrico fueron coprocesadas*. Ministerio del Ambiente. <http://www.ambiente.gob.ec/>

**Erickson, M. D.** (2018). *Analytical chemistry of PCBs* (2.a ed.). Lewis Publisher. <https://books.google.com.ec>



/03/

# METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EJECUTABLES PARA SISTEMAS DE FABRICACIÓN

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF EXECUTABLE SIMULATION MODELS FOR MANUFACTURING SYSTEMS

---

### **Sergio Benavent-Nácher**

Estudiante de Doctorado en Tecnologías Industriales y Materiales.

Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).

E-mail: [benavens@uji.es](mailto:benavens@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4091-542X>

### **Fernando Romero Subirón**

Catedrático de Universidad. Miembro del grupo de investigación Ingeniería de Fabricación.

Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).

E-mail: [fromero@uji.es](mailto:fromero@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1362-3656>

### **Pedro Rosado Castellano**

Profesor Titular de Universidad. Miembro del grupo de investigación Ingeniería de Fabricación

Dpto. de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño. Universitat Jaume I. Castellón de la Plana, (España).

E-mail: [rosado@uji.es](mailto:rosado@uji.es) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9822-9484>

**Recepción:** 21/09/2020 **Aceptación:** 07/01/2021 **Publicación:** 15/03/2021

#### **Citación sugerida:**

Benavent-Nácher, S., Romero, F., y Rosado, P. (2021). Metodología para el desarrollo de modelos de simulación ejecutables para sistemas de fabricación. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 49-71. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.49-71>

## RESUMEN

En los últimos años, la adopción de los principios de la Ingeniería de Sistemas Basados en Modelos (MBSE) en el contexto de los sistemas de fabricación ha promovido el desarrollo simulaciones de alta complejidad (simulaciones híbridas, multi-escala, multi-dominio, etc.) y gran fidelidad, algunas de ellas aplicables incluso en tiempo real (prototipos y gemelos virtuales). La elevada complejidad de los sistemas de fabricación modernos hace necesario el uso de metodologías bien fundadas para orientar de forma eficaz y eficiente la definición, transformación y ajuste de los modelos de simulación. Sin embargo, se han encontrado pocas propuestas que definan metodologías adecuadas para la simulación de sistemas de fabricación. Este trabajo presenta la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling), basada en la utilización sinérgica de SysML y Modelica y desarrollada para soportar la construcción de modelos ejecutables de simulación multi-dominio para sistemas complejos de fabricación. Además, se presenta un caso de estudio en el que se aplicado esta metodología para la definición de modelos de simulación ejecutables de una línea de ensamblaje multi-etapa que integra aspectos de calidad geométrica y de productividad. Los resultados de este caso permiten comparar diversas lógicas de control, así como demostrar la validez de la metodología propuesta.

## PALABRAS CLAVE

Metodología, Simulación multi-dominio, Sistemas de ensamble multietapa, SysML, Modelica.

## ABSTRACT

*In recent years, the adoption of the principles of Model Based Systems Engineering (MBSE) in the context of manufacturing systems has promoted the development of highly complex (hybrid simulations, multi-scale, multi-domain, ...) and high-fidelity simulations, some of them applicable even in real time (prototypes and virtual twins). The high complexity of modern manufacturing systems requires the use of well-founded methodologies to effectively and efficiently guide the definition, transformation and adjustment of the simulation models. However, few proposals address the definition of adequate methodologies for the manufacturing systems simulation. This work presents the methodology for Simulation Systems Modeling (SSM methodology), based on the synergistic use of SysML and Modelica. This methodology has been developed to support the construction of executable and multi-domain simulation models for complex manufacturing systems. In addition, a case study is presented, where this methodology is applied to define executable simulation models of a multi-stage assembly line that integrate geometric quality and productivity aspects. The results of this case study enable to compare different control logics, as well as to demonstrate the validity of the proposed methodology.*

## KEYWORDS

*Methodology, Multi-domain simulation, Multistage assembly systems, SysML, Modelica.*

# 1. INTRODUCCIÓN

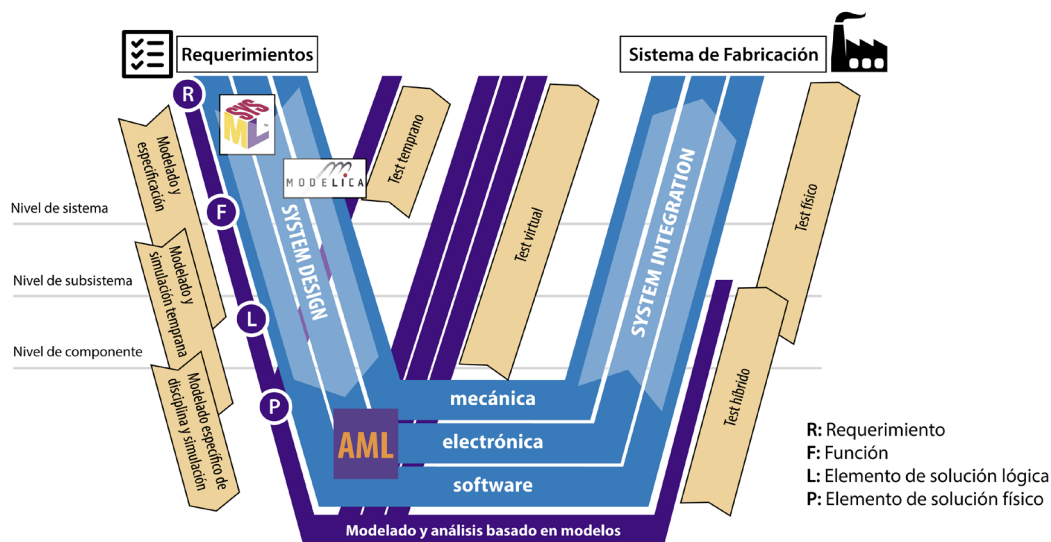
El incremento de la complejidad de los sistemas de fabricación, impulsada por la adopción de algunas de las nuevas tecnologías y estrategias de control asociadas a iniciativas como Industria 4.0 (Alemania) o la Internet Industrial (USA), fuerza a las empresas a adoptar una Ingeniería de Sistemas Basada en Modelos (MBSE), sustituyendo unos procesos de ingeniería centrados en documentos por otros basados en modelos. El uso de modelos resulta especialmente ventajoso en el desarrollo de simulaciones y experimentos sobre los modelos ejecutables, entre otras muchas aplicaciones, como se indica en Johnson et al. (2011).

Este trabajo pone el foco en esta actividad de modelado y simulación (M&S), proponiendo una metodología que adopta el enfoque MBSE para el diseño del propio sistema de simulación, en concreto cuando se aborda el diseño inicial del sistema de fabricación a nivel de sistema (simulación off-line), antes de inicializar el diseño y la simulación disciplinar (mecánica, eléctrica, etc.). El modelado y la simulación durante el diseño de sistemas permite sustituir los experimentos físicos por tests virtuales, acortando de manera significativa los ciclos de diseño y reduciendo los costes (Sinha *et al.*, 2000). Además, estos modelos de simulación a nivel de sistema pueden servir de base para la creación de modelos ligeros utilizables en la simulación on-line, una línea de trabajo que está siendo objeto de muchas investigaciones, soportada por tecnologías como la del gemelo digital, que se han puesto de moda en los últimos años.

El proceso de diseño y desarrollo de sistemas de fabricación basado en modelos adoptado en nuestra propuesta se muestra en Figura 1, que representa el flujo de actividades del típico Modelo en V de la Ingeniería de Sistemas adaptado al enfoque MBSE (Fritzson, 2004; Eigner, Gilz y Zafirov, 2012). Inicialmente el modelo sólo consideraba una V (azul claro en la Figura 1), en la que la rama ascendente representa el proceso de integración de las partes y la verificación y validación, a diferentes niveles de composición, en base al ensayo de un prototipo físico. Posteriormente, con la adopción del enfoque MBSE se incorporó toda una serie de actividades adicionales relacionadas con el modelado y el análisis basado en modelos (líneas en azul oscuro). La representación en V de estos modelos de proceso nos



traslada la idea de que existe una fuerte y continua interacción entre las actividades de diseño (rama descendente) y las de verificación y validación de las soluciones (ramas ascendentes), que en estos modelos adquieren especial relevancia cuando se adopta el enfoque MBSE. Una circunstancia que se percibe visualmente, al comprobar la incorporación de nuevas ramas (azules) ascendentes, en las que los ensayos del sistema mediante simulaciones (digitales), de diferente nivel de detalle y alcance, adquieren una especial relevancia.

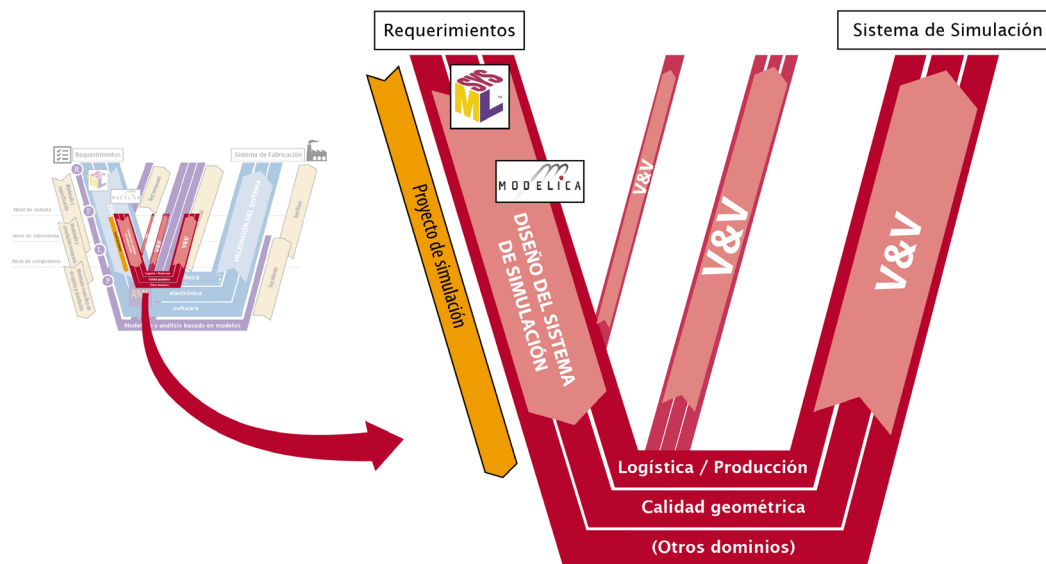


**Figura 1.** Modelo en V aplicado a sistemas de fabricación.

**Fuente:** elaboración propia, inspirado en Eigner et al. (2012).

Pero el modelo en V siempre se ha relacionado con el diseño y desarrollo del sistema físico (p. e. el de un sistema de fabricación) y en él no se visualizaba el diseño y desarrollo de los sistemas de simulación que, como sistemas, también deben estar sujetos al mismo proceso en V con el enfoque MBSE. Para resaltar esta circunstancia, con la Figura 2 se quiere indicar que cuando se realiza el modelado y la simulación temprana del sistema físico, con los correspondientes test tempranos, en paralelo se debe iniciar el proceso de diseño y desarrollo del sistema de simulación correspondiente, marcado en color

rojo sobre el modelo en V del primer proceso. Esta V, ampliada en la parte derecha de la Figura 2, contempla el desarrollo de un sistema de simulación completo, que puede llegar a integrar simulaciones de dominio de un nivel muy detallado (realista).



**Figura 2.** Modelo en V aplicado a sistemas de simulación.

**Fuente:** elaboración propia.

Ahora bien, como este trabajo se centra en la fase de M&S temprana de un sistema de fabricación (M&S a nivel de sistema) y, en concreto, en el sistema de simulación que dará soporte a la misma, nuestro foco será la fase representada por V superior izquierda. Esta fase de diseño y desarrollo de un sistema de simulación, a nivel de sistema, deberá contemplar todo el ciclo de vida del modelo de simulación (Galland, Grimaud y Campagne, 2000), compuesto por las cuatro fases típicas de las metodologías tradicionales de resolución de problemas (análisis, especificación, concepción e implementación) y por un conjunto de fases específicas del proyecto de simulación: diseño de los planes experimentales, de los

experimentos y de la estructura de los resultados. Estas fases, que se pueden identificar asociadas a la rama descendente de la Figura 2, tendrán su reflejo en la metodología propuesta.

Otro aspecto a considerar, a la hora de valorar nuestra propuesta metodológica, tiene que ver con la evolución que han sufrido las simulaciones a nivel de sistema en los últimos años. El enfoque MBSE, que ha impulsado la mejora de las capacidades de las plataformas de M&S, y el incremento vertiginoso de capacidad de procesamiento de los ordenadores han posibilitado el desarrollo simulaciones de alta complejidad (simulaciones híbridas, multi-escala, etc.) y multidominio de sistemas complejos, como es el caso de los sistemas de fabricación (Van Noten, Gadeyne y Witters, 2017). Pero este desarrollo no se ha visto acompañado por la adopción de metodologías bien fundadas que permitan que el proceso de definición, transformación y ajuste de los diferentes modelos de simulación sea eficiente y eficaz. Como se afirmaba en Galland et al. (2000) aún es poco frecuente que el desarrollo de estas herramientas de simulación esté apoyado en una metodología concreta.

Por ello, en el presente trabajo se pretende cubrir esta carencia, definiendo la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling). Se trata de una metodología desarrollada con el objetivo de soportar la construcción de modelos de simulación ejecutables y multi-dominio para sistemas complejos, como es el caso de los sistemas avanzados de fabricación, y que está basada, como veremos más adelante, en explotar la sinergia de dos lenguajes orientados a objetos, SysML y Modelica, bajo un enfoque MBSE.

Con este fin, el trabajo se ha organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se describe la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo. Posteriormente, en la Sección 3, se describe la metodología SSM. Finalmente, en la Sección 4 se recogen las conclusiones del trabajo.

## 2. METODOLOGÍA

La necesidad de desarrollar la metodología, con el objetivo indicado anteriormente, surgió en el marco de una investigación más amplia dirigida a diseñar e implementar una plataforma de M&S para sistemas de fabricación multi-etapa y, en concreto, para dar soporte al desarrollo de un prototipo de M&S multidominio y multiescala que permite visualizar y evaluar las funcionalidades y modos de operación de los sistemas de ensamblaje multietapa (MAS), tanto en términos de calidad geométrica como de productividad (Benavent-Nácher *et al.*, 2020). Sin embargo, la generalidad de la propuesta permite utilizarla en el desarrollo de cualquier sistema de simulación.

La metodología para el desarrollo de la metodología SSM, nuestro objetivo, contempla cinco pasos que contienen toda una serie de tareas que interaccionan entre sí, formando un sistema dinámico. Estos pasos son:

- **Paso 1.** Revisión bibliográfica. Este primer paso se articula en dos etapas: a) una revisión general sobre el concepto de el Modelado y la Simulación de Sistemas Complejos, con una búsqueda centrada alrededor de palabras clave como Modelling and Simulation, Complex Systems, Co-simulation, MBSE Approach, Simulation Languages, Smart Manufacturing, Digital Factory o Digital Twin; y b) una revisión sobre metodologías de M&S, centradas fundamentalmente en sistemas mecatrónicos y sistemas de fabricación. Como se ha indicado, las referencias con propuestas metodológicas sobre el modelado de sistemas de simulación encontradas han sido escasas, aunque interesantes de cara a construir nuestra propuesta.
- **Paso 2.** Análisis de los lenguajes y técnicas de modelado de sistemas. En este paso se han considerado diversas alternativas de lenguajes empleados habitualmente en el M&S de sistemas complejos, especialmente en el ámbito de los sistemas de fabricación.
- **Paso 3.** Análisis del proceso de diseño de sistemas de simulación, identificando las principales etapas o tareas y la información implicada en cada una de ellas.

- **Paso 4.** En base a las conclusiones de los pasos anteriores, desarrollar y definir la propuesta metodológica.
- **Paso 5.** Evaluación de la metodología propuesta en base a su aplicación a un caso de estudio.

### 3. RESULTADOS

En base a los pasos definidos en el apartado anterior, se elaboró la metodología SSM, que se presenta en el apartado 3.2. Se trata de una metodología que responde a los requisitos, que se exponen previamente en el apartado 3.1. Finalmente, con el objetivo de validar la propuesta, en el apartado 3.3 se presenta un ejemplo de aplicación de la misma.

#### 3.1. REQUISITOS DE LA METODOLOGÍA

Para el establecimiento de los requisitos del sistema de simulación es fundamental tener en cuenta a todas las partes interesadas en este sistema, que en este caso serán los participantes en el proceso de diseño y desarrollo de sistemas de fabricación físico, básicamente ingenieros/as de sistemas, de fabricación/producción, de automatización, de calidad, etc. Esto es así porque el sistema de simulación es básico para el trabajo colaborativo, entre especialistas de diversas disciplinas, que sustenta el diseño de cualquier sistema complejo.

Según Bassi et al. (2006), cualquier metodología de diseño de un artefacto técnico, como es el caso de un sistema de simulación, además de establecer el proceso, camino para desarrollar el artefacto, debe incidir en la forma en que el sistema es descrito, es decir el modelado. Por ello, va a ser muy importante que la metodología SSM favorezca la comunicación y colaboración interdisciplinar, un aspecto que es muy importante tanto a la hora de establecer los procedimientos y lenguajes de modelado como el flujo de actividades a desarrollar y su coordinación.

Por lo que respecta al modelado, es importante valorar la oportunidad de definir modelos descriptivos como apoyo a la definición de modelos de simulación ejecutables, explorando las necesidades de integración de estos y, en concreto, las posibilidades de transformación de modelos descriptivos a ejecutables y viceversa. Otro aspecto a valorar es el enfoque, el tipo de vistas que cubre (requerimientos, estructuras, comportamiento, etc..) y la expresividad y grado de formalidad del lenguaje/s seleccionados y, especialmente los tipos de comportamiento (híbrido, multidominio, etc..) que se pueden describir. Por lo que respecta al enfoque de modelado, cabe indicar que los lenguajes de modelado orientados a objetos ofrecen una clara ventaja por lo que respecta al desarrollo, mantenimiento y reutilización de los modelos.

Teniendo en consideración todo lo comentado hasta el momento, los requisitos fundamentales adoptados para el desarrollo de la metodología SSM se pueden concretar en su capacidad para:

- Facilitar el trabajo colaborativo y multidisciplinar de todos los interesados/as en el diseño, verificación y validación del sistema físico y del sistema de simulación correspondiente, garantizando la continuidad digital (transformaciones entre modelos, etc..) desde la especificación del diseño del sistema físico hasta la verificación y validación del modelo de simulación ejecutable.
- Soportar el diseño de sistemas de simulación modulares, en base a su “componentización”, utilizando el mecanismo de instanciación de componentes de librerías. Se trata de una propiedad que, como ya se ha citado, posee la orientación a objetos.
- Abarcar todo el proceso de definición y desarrollo del sistema de simulación, desde el establecimiento de los requisitos hasta la definición de modelos de simulación ejecutables, incluyendo los procesos de soporte de este (trazabilidad, etc.).
- Ser implementable en entornos/plataformas para el modelado de sistemas, aprovechando las facilidades que éstas ofrecen para la verificación e integración de modelos.
- Modelar diferentes puntos de vista (dominios y perspectivas) y diferentes dinámicas de sistema (de eventos discretos, de dinámica continua e híbridos).

## 3.2. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 3.2.1. PROPUESTA PARA EL MODELADO

En este apartado se define la forma en que el sistema va a ser descrito. Se ha optado por utilizar SysML y Modelica, ambos con una clara orientación a objetos, para que el proceso pueda beneficiarse de las sinergias que proporciona su uso conjunto. Los lenguajes y los métodos orientados a objetos adquieren cada día más un lugar relevante en el campo de Modelado de Sistemas, especialmente tras la aparición del Lenguaje de Modelado Unificado (UML) y el mecanismo de extensión que posee, que permite el desarrollo de lenguajes especializados o específicos de un dominio, como es el caso el Lenguaje de Modelado de Sistemas (SysML).

SysML es un lenguaje descriptivo (gráfico) para el modelado de sistemas en general que permite el establecimiento de comunicaciones formales y no-ambiguas entre ingenieros de sistemas, diseñadores y analistas de sistemas, soportando la capacidad de comunicación incluso entre personas que no sean necesariamente especialistas. SysML se ha mostrado como un lenguaje claramente válido para el diseño y modelado de sistemas complejos, como es el caso de los Sistemas de Producción Ciber-Físicos (CPPS). Además, en este momento ya son numerosas las publicaciones sobre el diseño y modelado de equipos y sistemas de fabricación en las que SysML juega un papel fundamental a la hora de integrar todos los modelos desarrollados, siendo también utilizado en el diseño de sistemas de simulación (Nikolaidou *et al.*, 2012). Esta circunstancia es relevante a la hora de integrar la especificación del sistema y su simulación.

Sin embargo, aunque se están desarrollando perfiles de SysML, como ModelicaML (Schamai, 2009), el estándar actual no permite la creación de modelos de simulación ejecutables. Por ello, en la metodología propuesta, el estándar SysML se utiliza como lenguaje de diseño, para favorecer la colaboración interdisciplinar, y como base para la elaboración de los modelos ejecutables definidos con el lenguaje Modelica. Modelica es un lenguaje textual orientado a objetos que permite simular sistemas de eventos discretos y de dinámica continua, mediante el modelado de las ecuaciones que gobiernan

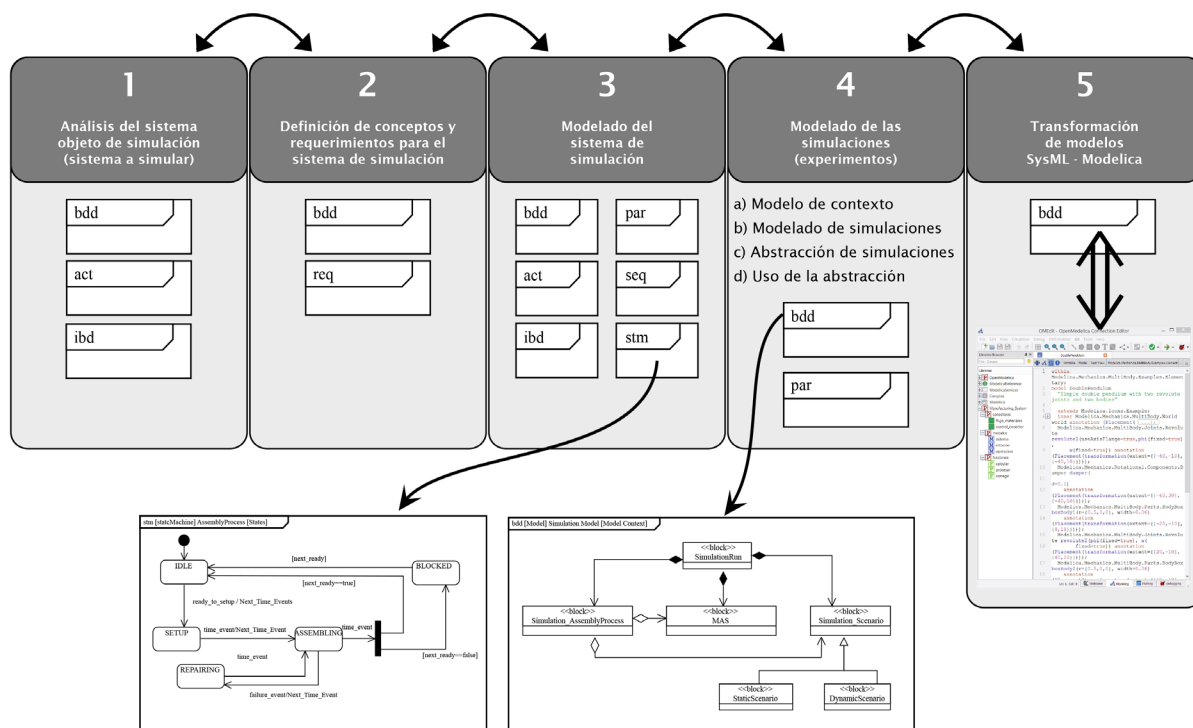
sus comportamientos. Se trata por tanto de un lenguaje, que de igual forma que SysML, es adecuado para tomar en consideración las restricciones en la fase de diseño conceptual bajo un enfoque MBSE. Esta capacidad de SysML para modelar restricciones ha sido utilizada en algunos trabajos para realizar modelos de dominio, como los del diseño mecánico [Penas].

Se trata de unos estándares que están soportados por diferentes entornos/plataformas de modelado (VisualParadigm, Papyrus, etc.) y simulación (Dymola, OpenModelica, etc.), tanto comerciales como de código libre, lo que facilita el diseño, implementación y uso de modelos de simulación. Entre estas facilidades destacan las funcionalidades que ayudan a verificar la corrección y consistencia de los modelos elaborados. Además, la transformación SysML-Modelica y viceversa es un campo de investigación muy activo en los últimos años, por lo que se espera que estos entornos incorporen próximamente funcionalidades que ayuden a automatizar estas transformaciones (Paredis *et al.*, 2010).

### 3.2.2. PROCESO PROPUESTO

En base a los requisitos comentados anteriormente se ha desarrollado un proceso metodológico de 5 pasos, que van más allá de la propia especificación del sistema de simulación, porque contempla su vinculación con la especificación del sistema físico a simular, también descrita con SysML. El proceso es general y, por lo tanto, aplicable al diseño de cualquier sistema de simulación, pero conviene recordar que la propuesta está orientada a simular principalmente sistemas de fabricación, siendo este el contexto que tomaremos como referencia. Además, el proceso propuesto no es estrictamente secuencial, pues contempla la posibilidad de solape de los pasos y de realimentaciones continuas motivadas por la modificación, mejora y/o ampliación del modelo. Los cinco pasos y la dinámica del proceso se muestran en la Figura 2, en la que también se aprecian el tipo de artefactos generados (diagramas, etc.) en cada uno de los pasos.





**Figura 3.** Proceso de diseño del sistema de fabricación en la metodología SSM.

**Fuente:** elaboración propia.

Por último, es importante comentar que el proceso definido a continuación, como ocurre con cualquier proceso, está condicionado por los lenguajes escogidos, SysML y Modelica. A continuación, se describen de forma más detallada cada uno de los cinco pasos que componen el proceso de la metodología SSM.

### **Paso 1: Análisis del sistema a simular**

En este primer paso se realiza el análisis de la estructura funcional y lógica del sistema físico a simular; en nuestro caso el sistema de fabricación que deseamos simular. Este sistema debe ser analizado para conocer

los elementos estructurales, funcionales y su comportamiento, así como las relaciones establecidas entre ellos. El análisis del sistema se realiza en base a todas las especificaciones y en especial a los diagramas SysML que lo describen: Diagramas de casos de uso (uc), Diagramas de actividad (act) y Diagramas de definición de bloques (bdd). En muchos casos este análisis puede comportar la ampliación y modificación de diagramas, asegurando su adecuación con las métricas a considerar en el sistema de simulación.

Algunas construcciones de estos modelos (bloques, etc.) aparecerán en el Diagrama de Contexto del sistema de simulación (nuestro sistema de interés), que se define en el paso 4. Por ello es importante comprobar que estas construcciones contengan todos aquellos atributos que se vinculan con las medidas de efectividad y con las metas impuestas con el objetivo de dar cumplimiento a los requerimientos establecidos para el diseño del sistema a simular.

## **Paso 2: Conceptos y requisitos para el sistema de simulación**

El segundo paso se centra en la definición de los conceptos y requisitos del sistema de simulación. En función del tipo de sistema que se quiere simular y de las metas y medidas de efectividad establecidas, el diseñador/a puede definir varios conceptos alternativos que sustenten el diseño del sistema de simulación (p. e. los aspectos a integrar -logístico/producción, calidad del producto, salud de los equipos, ... -, el paradigma de simulación, etc.) y posteriormente los requisitos para cada uno de ellos. En este paso los artefactos creados son Diagramas de casos de uso, Diagramas de requisitos (req) y Diagramas de definición de bloques.

## **Paso 3: Modelado del sistema de simulación**

A partir de los conceptos establecidos en el paso anterior, se selecciona una solución viable para la estructura de objetos y para el comportamiento prescrito del sistema de simulación. Las descripciones de estructura y comportamiento se descomponen al nivel de abstracción requerido y adecuado a las metas y métricas establecidas. Cabe destacar que en este caso la naturaleza del comportamiento, y por tanto su modelado, depende en gran medida del sistema a simular, pudiendo abarcar desde eventos

discretos a dinámicas continuas o incluso combinaciones de éstos (simulaciones híbridas). En este paso, los artefactos creados para la estructura son Diagramas de definición de bloques, y Diagramas de bloques internos (ibd), mientras que la definición del comportamiento viene descrita por Diagramas de actividades, Diagramas paramétricos (par), Diagramas de secuencia (sec), Diagramas de máquina de estados (stm), etc.

#### **Paso 4: Modelado de las simulaciones**

En este paso, a partir del modelo de simulación se establece cómo utilizarlo para simular el sistema físico. Para ello, el sistema de simulación se debe relacionar con otra información de diseño como el modelo del sistema físico, los datos de los escenarios de simulación, las metas perseguidas, etc. Para ello se establecen las siguientes tareas:

- a) La definición de un modelo de contexto, donde los elementos del sistema de simulación se vinculan con los elementos correspondientes del sistema a analizar para preservar la consistencia entre todos los modelos.
- b) El modelado de las simulaciones, definiendo las ejecuciones de simulación a realizar según los escenarios considerados.
- c) La abstracción de la simulación, definiendo las medidas de eficacia y la agregación de los resultados.
- d) El uso de la simulación abstraída en el contexto de la optimización del diseño, relacionándolas con los requisitos de las partes interesadas y los objetivos para las medidas de eficacia señaladas en el modelo del sistema a analizar (paso 1).

### **Paso 5: Transformación de modelos SysML-Modelica**

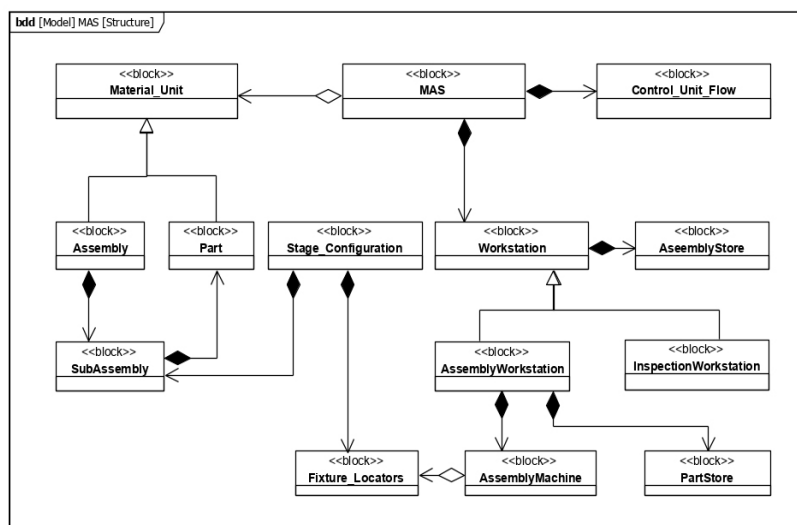
Para obtener un modelo de simulación ejecutable, todas las descripciones del sistema previas deben implementarse utilizando un lenguaje con esta capacidad, como es Modelica. Sin embargo, no es suficiente con trasladar los modelos a un nuevo lenguaje, sino que es necesario incrementar el nivel de detalle añadiendo algunos parámetros y relaciones que permitan la ejecución del modelo.

Como se ha comentado anteriormente, el proceso descrito no es estrictamente secuencial, sino que considera flujos de realimentación para modificar, mejorar y/o ampliar el modelo. Una vez completados todos los pasos se dispondrá de un modelo ejecutable que es necesario validar, por ejemplo, mediante una instanciación que permita su ejecución. De esta forma se puede contrastar la fidelidad del modelo de simulación con respecto al comportamiento del sistema a simular y el cumplimiento de los requerimientos establecidos en el paso 2.

### **3.3. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA**

A continuación se presenta la aplicación de la metodología SSM para la elaboración del modelo de simulación de un sistema de ensamble multi-etapa (MAS) (Benavent-Nácher *et al.*, 2020). Se trata de un sistema de simulación multi-dominio que considera tanto el flujo de materiales y órdenes como la propagación de las características de calidad de las piezas. Por cuestiones de espacio solo se presentan algunos de los resultados de esta aplicación, deteniéndonos en los pasos 3, 4 y 5 de la propuesta.

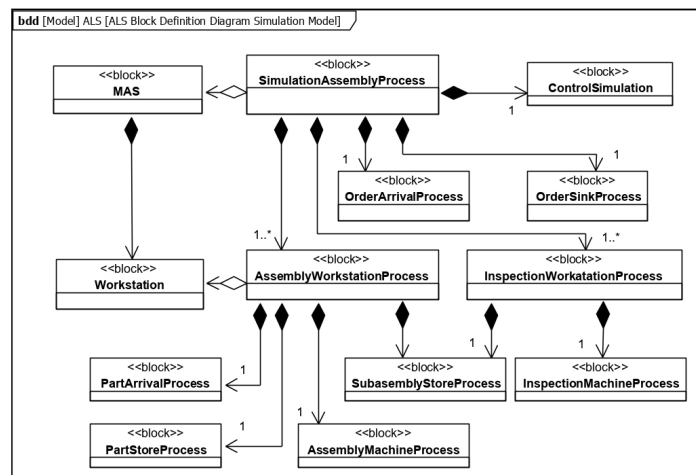
En el primer paso de la metodología se realiza el análisis de la estructura funcional y lógica del sistema a simular (MAS). Atendiendo a las características del MAS se modeló su estructura, representada en el diagrama de bloques de la Figura 4. En él se pueden observar los diferentes elementos que constituyen el sistema (ensamble, subensamble, pieza, estación de trabajo, estación de ensamble, estación de inspección, etc.) y las relaciones entre ellos.



**Figura 4.** Diagrama de bloques. Estructura del MAS para simular.

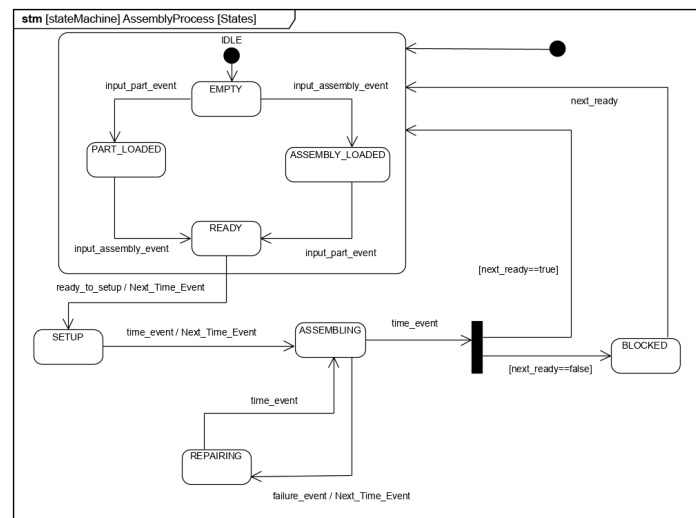
**Fuente:** elaboración propia.

Seguidamente, en el paso 2 se definieron algunos requerimientos del sistema de simulación. Uno de los principales requerimientos considerados es la adopción del formalismo para simulación de eventos discretos (DEVS). En base a estos requerimientos, se abordó el paso 3, definiendo el modelado estructural y de comportamiento del sistema de simulación. Como resultado de este modelado se muestra, por ejemplo, el diagrama de bloques de la Figura 5, en el que se define la estructura del sistema de simulación, y el diagrama de máquina de estados de la Figura 6. Cabe señalar que en este caso el sistema a simular tiene un comportamiento discreto que se ha descrito a través de los correspondientes diagramas de máquina de estado.



**Figura 5.** Diagrama de bloques. Estructura del sistema de simulación.

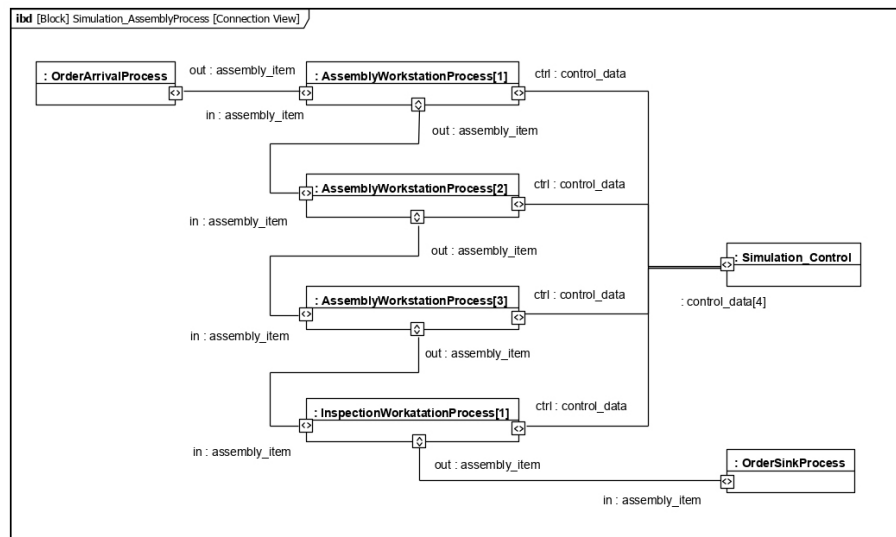
**Fuente:** elaboración propia.



**Figura 6.** Diagrama de máquina de estados. Proceso de una estación de ensamble.

**Fuente:** elaboración propia.

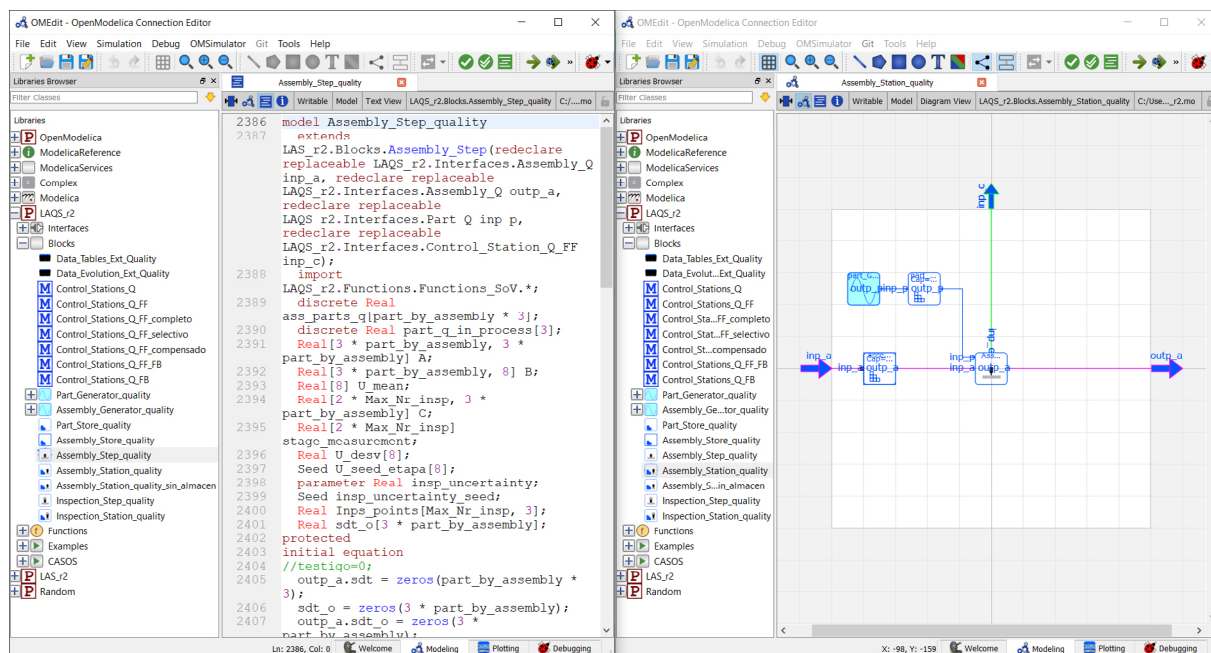
A continuación, como parte del paso 4, se definieron las simulaciones y el sistema de simulación, del que se muestra el Diagrama de bloques internos en la Figura 7. En él se puede apreciar la estructura de la instancia de línea de ensamble (MAS) simulada, formada por cuatro etapas de proceso (tres de ensamble y una etapa de inspección final), un proceso de control y los procesos de llegada y salida de órdenes.



**Figura 7.** Diagrama de bloques internos. Estructura interna del proceso de ensamble.

**Fuente:** elaboración propia.

Finalmente, en el paso 5 se trasladaron todos los modelos SysML al lenguaje Modelica, desarrollando una implementación sobre OpenModelica para obtener los modelos de simulación ejecutables. La Figura 8 muestra dos capturas de pantalla de OpenModelica en las que se pueden apreciar los modelos implementados, tanto en su versión textual como a través de la vista gráfica.

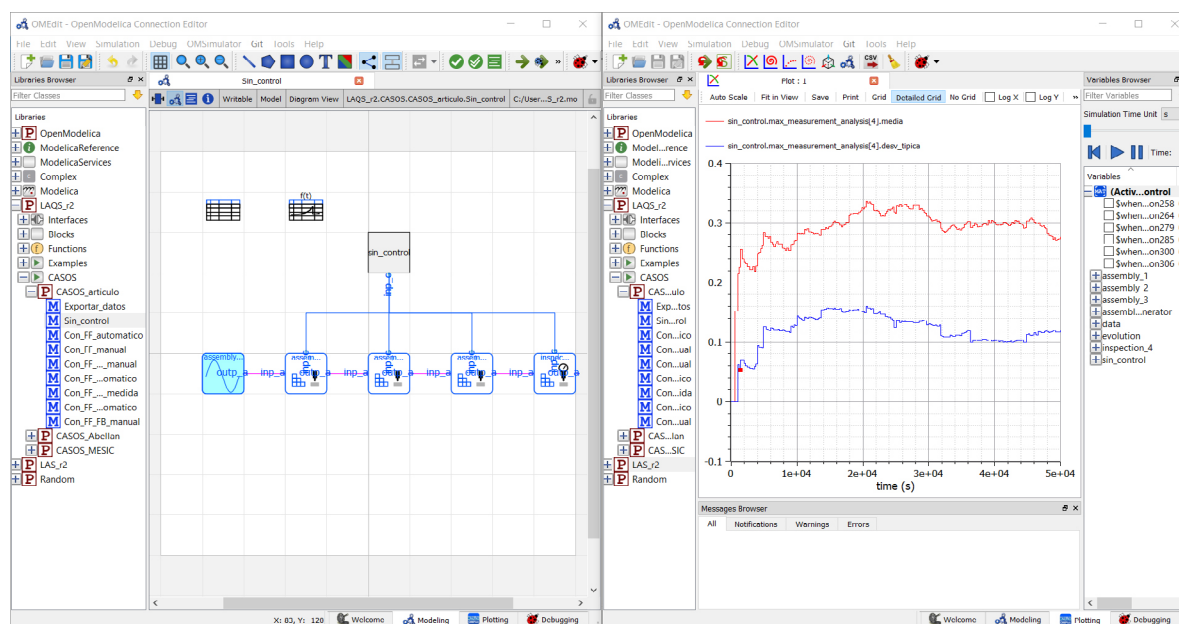


**Figura 8.** Modelos implementados en OpenModelica. a) Modelo textual; b) Vista gráfica.

**Fuente:** elaboración propia.

Tras completar la implementación del modelo de simulación se procedió a validarlo mediante su instanciación para simular la línea de ensamble de 4 etapas, pudiéndose comprobar que tanto la construcción como la ejecución del modelo de simulación ejecutable fueron exitosas. También se pudo contrastar que el comportamiento y resultados obtenidos cumplían con los requisitos fijados. La Figura 9 muestra dos capturas de OpenModelica con la vista gráfica del modelo de simulación de la línea de ensamble y un ejemplo de los resultados obtenidos en la simulación.





**Figura 9.** Validación mediante instanciación del modelo para una línea de ensamble de 4 etapas. a) Línea de ensamble (vista gráfica); b) Ejemplo de resultados obtenidos.

**Fuente:** elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

Para el diseño de sistemas de simulación resulta fundamental la adopción de metodologías bien fundadas, de manera que el proceso de definición, transformación y ajuste de los diferentes modelos sea eficiente y eficaz. Sin embargo, son pocas las propuestas que abordan esta cuestión desde un punto de vista metodológico. Por ello, se ha propuesto la metodología SSM (methodology for Simulation System Modelling). Esta metodología propone un proceso en cinco pasos y se beneficia de la utilización sinérgica de SysML y Modelica, aunque todavía son necesarios esfuerzos de integración entre estos lenguajes. La propuesta metodológica se ha validado mediante su aplicación al diseño y desarrollo de un sistema para la simulación de un determinado tipo de línea de ensamblaje multi-etapa. Los resultados obtenidos han

sido satisfactorios, tanto en el modelado del sistema de simulación como en los resultados de las diversas simulaciones ejecutadas, y muestran la adecuación de la metodología SSM.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de la Generalitat Valenciana a través de la ayuda con referencia ACIF/2019/095.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bassi, L., Secchi, C., Fantuzzi, C., y Bonfe, M.** (2006). An object-oriented approach to manufacturing systems modeling. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 442-447. <https://doi.org/10.1109/COASE.2006.326922>
- Benavent-Nácher, S., Rosado, P., Romero, F., y Abellán-Nebot, J. V.** (2020). Multidomain Simulation Model for Analysis of Geometric Variation and Productivity in Multi-Stage Assembly Systems. *Applied Sciences*, 10(18), 6606.
- Eigner, M., Gilz, T., y Zafirov, R.** (2012). *Interdisciplinary Product Development - Model Based Systems Engineering* <https://www.plmportal.org/en/research-detail/interdisciplinary-product-development-model-based-systems-engineering.html>
- Fritzson, P.** (2004). *Principles of Object Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Wiley IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/9780470545669>
- Galland, S., Grimaud, F., y Campagne, J. P.** (2000). Methodological approach for distributed simulation: general concepts for MA MA-S. In *European Simulation Multiconference on Simulation and Modelling: Enablers for a Better Quality of Life*, 77-82.

- Johnson, T., Kerzhner, A., Paredis, C. J. J., y Burkhart, R.** (2011). Integrating Models and Simulations of Continuous Dynamics Into SysML. *ASME Journal of Computing Information Science in Engineering*, 12(1), 011002. <https://doi.org/10.1115/1.4005452>
- Nikolaidou, M., Kapos, G., Dalakas, V., y Anagnostopoulos, D.** (2012). Basic guidelines for simulating SysML models: An experience report. In *7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 95-100. <https://doi.org/10.1109/SYSoSE.2012.6384172>
- Paredis, G. J. J., Bernard, Y., Burkhart, R. M., de Koning, H.-P., Friedenthal, S., Fritzson, P., Rouquette, N. F., y Schamai, W.** (2010). An overview of the SysML-Modelica transformation specification. *INCOSE International Symposium*, 20(1), 709-722. <https://doi.org/10.1002/j.2334-5837.2010.tb01099.x>
- Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S., y Hammadi, M.** (2016). Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. *Computers in Industry*, 86, 52-69. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>
- Schamai, W.** (2009). *Modelica modeling language (ModelicaML): A UML profile for Modelica*. Linköping University Electronic Press.
- Sinha, R., Paredis, C. J. J., Liang, V., y Khosla, P. K.** (2000). Modeling and Simulation Methods for Design of Engineering Systems. ASME. *Journal of Computing Information Science in Engineering*, 1(1). 84–91. <https://doi.org/10.1115/1.1344877>
- Van Noten, J., Gadeyne, K. y Witters, M.** (2017). Model-based Systems Engineering of Discrete Production Lines Using SysML: An Experience Report. *Procedia CIRP*, 60, 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.01.018>

/04/

# ANÁLISIS DEL ERROR HUMANO Y LA CALIDAD DEL PRODUCTO EN LA INDUSTRIA DE MANUFACTURA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS. ESTUDIO DE CASO

## ANALYSIS OF HUMAN ERROR AND PRODUCT QUALITY IN THE MEDICAL DEVICE MANUFACTURING INDUSTRY. CASE STUDY

---

### **Teresa Carrillo-Gutiérrez**

Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial, Profesora Investigadora. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.  
Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana. Baja California, (México).  
E-mail: [tcarrillo@uabc.edu.mx](mailto:tcarrillo@uabc.edu.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9674-3586>

### **Rosa María Reyes-Martínez**

Doctora en Ciencias de la Salud en el Trabajo, Profesora Investigadora. División de Estudios de Posgrado e Investigación.  
Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, (México).  
E-mail: [rosyreyes2001@yahoo.com](mailto:rosyreyes2001@yahoo.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4950-5045>

### **Karina Cecilia Arredondo-Soto**

Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial, Profesora Investigadora. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería.  
Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana. Baja California, (México).  
E-mail: [karina.arredondo@uabc.edu.mx](mailto:karina.arredondo@uabc.edu.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8929-7319>

### **Maria Marcela Solis-Quinteros**

Doctora en Ciencias Administrativas, Profesora Investigadora  
Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana. Baja California, (México).  
E-mail: [marcela.solis@uabc.edu.mx](mailto:marcela.solis@uabc.edu.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0567-0092>

**Recepción:** 03/10/2020 **Aceptación:** 14/01/2021 **Publicación:** 15/03/2021

#### **Citación sugerida:**

Carrillo-Gutiérrez, T., Reyes-Martínez, R. M., Arredondo-Soto, K. C., y Solis-Quinteros, M. M. (2021). Análisis del error humano y la calidad del producto en la industria de manufactura de dispositivos médicos. Estudio de caso. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 73-91. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.73-91>

## RESUMEN

El objetivo del estudio de caso es desarrollar una taxonomía de los factores humanos que influyen en los errores humanos y fallas que provocan defectos en la calidad del producto en la industria de manufactura de dispositivos médicos de la ciudad de Tijuana, Baja California, México.

La metodología es cualitativa-cuantitativa y se fundamenta en la Teoría del Consenso Cultural de la Antropología Cognitiva. La investigación tiene cuatro etapas secuenciales con un enfoque de métodos mixtos para la recopilación y análisis de datos. La etapa I consiste en un estudio contextual de la industria de manufactura a 67 empresas.

En la etapa II participaron cinco empresas y se usó el enfoque cualitativo con el instrumento de investigación llamado listados libres. En la etapa III, la técnica de sorteo por montones sucesivos se aplicó en la recopilación de datos para la clasificación de los elementos del Dominio Cultural. En ambas etapas participaron entrevistados de altos y medianos mandos de las empresas.

En la etapa IV se realizó una evaluación de los conocimientos de los operadores multifuncionales; el instrumento de investigación fue una encuesta con escalas de calificación diseñada a partir de los elementos del dominio cultural descritos en la etapa III. La validez interna de la encuesta y la confiabilidad de los participantes fueron estimadas con el coeficiente Alfa de Cronbach.

El resultado principal fue una taxonomía integrada por cinco categorías: factores técnicos, factores organizacionales internos, factores organizacionales indirectos, factores personales, factores humanos directos. Aun cuando la taxonomía no ha sido validada, se visualizan aportaciones de naturaleza práctica.

## PALABRAS CLAVE

Confiabilidad humana, Error humano, Teoría del Consenso Cultural, Calidad del producto.

## ABSTRACT

*The objective of the case study is to develop a taxonomy of the human factors that influence human errors and failures that cause defects in product quality in the medical device manufacturing industry in the city of Tijuana, Baja California, Mexico.*

*The methodology is qualitative-quantitative and is based on the Cultural Consensus Theory of Cognitive Anthropology. The research has four sequential stages with a mixed method approach to data collection and analysis. Stage I consists of a manufacturing industry contextual survey of 67 companies.*

*In stage II, five companies participated and the qualitative approach was used with the research instrument called free listings. In stage III, the technique of drawing lots by successive piles was applied in the data collection for the classification of the elements of the Cultural Domain. Interviewees from top and middle management of the companies participated in both stages.*

*In stage IV, an assessment of the knowledge of the multifunctional operators was carried out; the research instrument was a survey with rating scales designed based on the elements of the cultural domain described in stage III. The internal validity of the survey and the reliability of the participants were estimated with Cronbach's Alpha coefficient.*

*The main result was a taxonomy composed of five categories: technical factors, internal organizational factors, indirect organizational factors, personal factors and direct human factors. Even though the taxonomy has not yet been validated, it has made contributions of a practical nature.*

## KEYWORDS

*Human reliability, Human error, Cultural Consensus Theory, Product quality.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los errores humanos son reconocidos como un problema con consecuencias negativas en la vida de las personas y las organizaciones. Es necesaria su prevención para la reducción de costos y la mejora en la calidad de los procesos organizacionales. Sin embargo, son necesarios estudios con un análisis detallado de las circunstancias de los errores humanos para diseñar políticas, programas y procedimientos que contribuyan a su prevención.

Dada la importancia que presenta la identificación y clasificación del error humano y las causas que lo producen en el planteamiento de estrategias de prevención eficaz, surgió el interés por realizar una investigación. El objetivo del estudio es desarrollar una taxonomía de los factores humanos que influyen en los errores humanos y fallas que provocan defectos en la calidad del producto, a partir de los dominios culturales que poseen los actores de la calidad en la industria de manufactura de dispositivos médicos de la ciudad de Tijuana, Baja California, México.

La industria de manufactura llamada industria maquiladora, ha llegado a ser un elemento característico de la región de la frontera norte de México debido a los cambios acelerados que su presencia ha producido en términos de crecimiento de la población, industrias filiales o proveedoras, comercio y servicios (Douglas y Hansen, 2003).

## 2. METODOLOGÍA

En el trabajo de investigación se analizaron y discutieron los fundamentos teóricos y las tendencias actuales sobre el estudio e investigaciones referentes a la Confiabilidad Humana, Calidad y la Teoría del Consenso Cultural.

El desarrollo de la taxonomía se realizó en cuatro etapas, que se describen en la tabla 1. Se hace énfasis en el enfoque de investigación, el propósito y tipo de estudio realizado. La metodología científica utilizada se ubica en la antropología cognitiva, mediante la aplicación de la Teoría Informal del Consenso Cultural



(Anders, Oravec y Batchelder, 2014; Collins y Dressler, 2008; Caulking, 2004, Romney, Batchelder y Weller, 1987; Weller, 2007; Romney, 1999).

Las técnicas de recopilación de datos utilizadas en las cuatro etapas que conforman esta investigación son métodos de análisis del dominio cultural, descritos por Righi et al. (2013), Weller y Romney (1988) y Ross (2004) llamados listados libres, sorteo por montones y escalas de calificación. Estas técnicas fueron aplicadas de manera secuencial, de tal manera que el resultado de cada paso alimenta la recopilación de los datos de la siguiente etapa. El enfoque metodológico corresponde al de métodos cualitativo-cuantitativo, es decir, métodos mixtos.

Con respecto a la delimitación espacio temporal, se abarcó el complejo de manufactura integrado por sesenta y siete plantas para la etapa I de la metodología. Se incluyeron los sectores de manufactura de dispositivos médicos, electrónica, aeroespacial, automotriz, plásticos, muebles, metal-mecánica y de alimentos.

Asimismo, para las otras tres etapas del estudio se aplicó la metodología a una planta de manufactura de dispositivos médicos, ubicadas todas las empresas en Tijuana, Baja California, México; por lo tanto, los resultados obtenidos sólo serán aplicables a dichas empresas.

**Tabla 1.** Descripción y explicación de las etapas del estudio.

ETAPAS	Procedimiento recopilación datos y tamaño de muestra	Enfoque y tipo de diseño	Procedimiento de análisis de datos	Propósito de la etapa	Relación con la etapa anterior
1	Encuesta N = 67	Cuantitativo Transversal con análisis descriptivo	Análisis descriptivo	Estudio contextual para identificar las metodologías de análisis y evaluación de la calidad	No aplica

2	Listados libres/ generar elementos relevantes N = 23	Cualitativo Transversal con niveles de descripción	Tabulación de los elementos compilados y codificados por el grupo de seguridad	Identificación de los elementos que forman el dominio del conocimiento	Utilizar en la técnica de listados libres, los elementos relevantes obtenidos en la etapa I
3	Sorteo por montones/clasificar los elementos N = 21	Cualitativo y Cuantitativo Transversal con análisis correlacional	1. Análisis Clúster. 2. Escalamiento. 3. Análisis del Consenso Cultural.	Desarrollar las categorías mutuamente excluyentes y de alto nivel	Utilizar en la técnica de sorteo por montones, los elementos relevantes obtenidos en la etapa II
4	Encuesta con escalas de calificación N = 36	Cuantitativo Transversal con análisis correlacional	1. Análisis descriptivo. 2. Análisis de confiabilidad de la encuesta. 3. Análisis de confiabilidad de los encuestados.	1. Cuantificar los conocimientos de los operadores multifuncionales. 2. Comparar los conocimientos del grupo de seguridad con los de los operadores multifuncionales.	Utilizar las categorías en el diseño de una encuesta con escalas de calificación

**Fuente:** elaboración propia.

### 3. RESULTADOS

Con la mejora significativa de la confiabilidad y la estabilidad de las instalaciones y equipos, el error humano se ha convertido en uno de los factores más críticos para los defectos de calidad. Según la literatura, alrededor del 70% al 90% de los defectos de calidad en los sistemas de producción son directa o indirectamente debido a los errores humanos (Le, Qiang, y Liangfa, 2012). Los errores humanos generalmente han sido reconocidos como actos inseguros realizados por los operadores o los tomadores de decisiones (Liu, Hwang y Liu, 2009).

Algunos estudios han identificado los errores humanos que contribuyen a los defectos o fallas en procesos o productos tales como en Producción y Calidad (Qeshmy *et al.*, 2019; Neumann, Kolus y Wellss, 2016; Layer, Karwowski y Furr, 2009; Lin, Drury y Kim, 2001; Bubb, 2005; Sylla y Drury, 1995; Le *et al.*, 2012; Haug, Zachariassen y van Liempd, 2011; Wang, 2013).

También sobresalen otros estudios en la industria de la manufactura con enfoque de Confiabilidad (Torres, Nadeau y Landau, 2019; Muxfeldt y Steil, 2018; Refflinghaus y Kern, 2018; Salas-Arias *et al.*, 2018; Lopes y Forster, 2013; Power y Fox, 2014; Ruiz-Moreno y Trujillo, 2012; Brito *et al.*, 2011; Myszewski, 2010; Paun *et al.*, 2011; Boring, Griffith y Joe, 2007; Taylor-Adams y Kirwan, 1997; Baber y Stanton, 1996; Razak, Kamaruddin y Azid, 2008; Ruckart y Burgess, 2007; Drury, 2002; Drury y Watson, 1999; Fujita y Hollnagel 2004) y, la industria militar (Yu *et al.*, 2000; Wang y Zhao, 2010).

La identificación y clasificación del error humano se realiza mediante el uso de taxonomías. Las taxonomías han sido ampliamente utilizadas en la ciencia. El campo del estudio del error humano no ha sido la excepción. Una taxonomía es un requisito fundamental para la creación de la ciencia empírica, cuando se desea una profunda comprensión de la naturaleza, de los orígenes y las causas del error humano. Por lo tanto, es necesario contar con un sistema de clasificación inequívoca para describir el fenómeno, objeto de estudio (Moray y Senders, 1991).

El Sistema de Análisis y Clasificación de Factores Humanos (HFACS por sus siglas en inglés) ha sido considerado por importantes investigadores como el sistema con la mejor taxonomía que fue desarrollada en la aviación militar para el análisis de accidentes de trabajo y está siendo utilizada con éxito en los sistemas de alto riesgo (Baker y Krokos, 2007; Beaubien y Baker, 2002).

En este panorama se visualiza la necesidad de generar datos empíricos y desarrollar taxonomías que permitan a los actores de la investigación y análisis, identificar y clasificar la causalidad de los errores humanos y su efecto en la calidad del producto, con un enfoque al error humano a partir de los factores humanos.

A continuación, se presentan los estudios que han identificado los errores humanos que contribuyen a los defectos o fallas en procesos o productos en el contexto de la industria de manufactura en el ámbito de la producción y en el ámbito de la calidad con un enfoque metodológico cuantitativo.

**Tabla 2.** Algunos estudios realizados en el ámbito de la producción y la calidad con enfoque de investigación cuantitativo.

ÁMBITO	ENFOQUE METODOLÓGICO	ENFOQUE DE ESTUDIO DEL ERROR HUMANO	FUENTE
Producción	Cuantitativo	Ingeniería	Yu <i>et al.</i> (2000)
	Cuantitativo	Ingeniería	Kumar, Kumar y Kumar (2007)
	Cuantitativo	Ingeniería	Myszewski (2010)
	Cuantitativo	Ingeniería	Miralles <i>et al.</i> (2011)
	Cuantitativo	Ingeniería	Salas-Arias <i>et al.</i> (2018)
	Cuantitativo	Ingeniería	Lopes y Forster (2013)
Calidad	Cuantitativo	Ingeniería	Sylla y Drury (1995)
	Cuantitativo	Ingeniería	Paun <i>et al.</i> (2011)
	Cuantitativo	Ingeniería	Le, Qiang y Liangfa (2012)
	Cuantitativo	Ingeniería	Martínez (2012)
	Cuantitativo	Ingeniería	Murguía, del Pino y Villa (2013)

**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, se presentan en la Tabla 3, los estudios que han identificado los errores humanos que contribuyen a los defectos o fallas en procesos o productos en el contexto de la industria de manufactura en el ámbito de la producción y en el ámbito de la calidad con un enfoque metodológico mixto.

**Tabla 3.** Algunos estudios realizados en el ámbito de la producción y la calidad con enfoque de investigación mixto.

ÁMBITO	ENFOQUE METODOLÓGICO	ENFOQUE DE ESTUDIO DEL ERROR HUMANO	FUENTE
Producción	Cualitativo-cuantitativo	Ergonomía cognitiva	Brito <i>et al.</i> (2011)
	Cualitativo-cuantitativo	Ergonomía cognitiva	Qeshmy <i>et al.</i> (2019)
	Cualitativo-cuantitativo	Ergonomía cognitiva	Báez <i>et al.</i> (2013)
Calidad	Cualitativo-cuantitativo	Ingeniería	Power y Fox (2014)
	Cualitativo-cuantitativo	Enfoque de sistemas	Bubb (2005)

**Fuente:** elaboración propia.

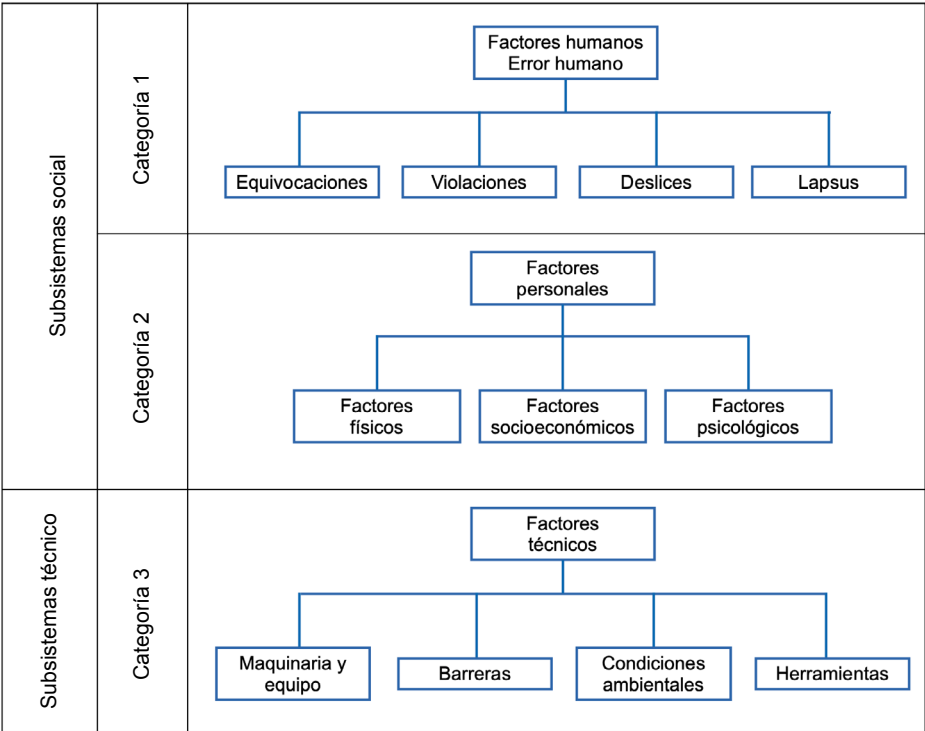
En la Tabla 4 se presentan los estudios que han identificado los errores humanos que contribuyen a los defectos o fallas en procesos o productos en el contexto de la industria de manufactura en el ámbito de la producción y en el ámbito de la calidad con un enfoque metodológico cualitativo.

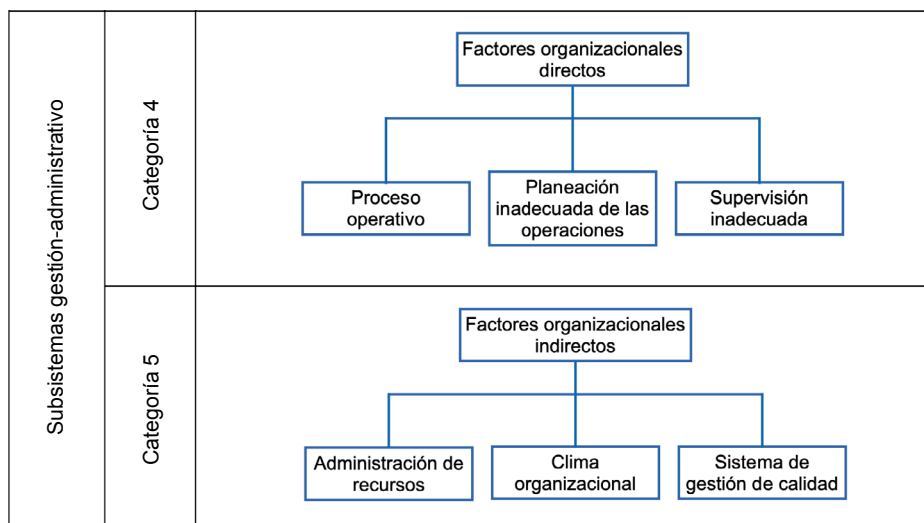
**Tabla 4.** Algunos estudios realizados en el ámbito de la producción y la calidad con enfoque de investigación cualitativo.

ÁMBITO	ENFOQUE METODOLÓGICO	ENFOQUE DE ESTUDIO DEL ERROR HUMANO	FUENTE
Calidad	Cualitativo	Ergonomía Cognitiva	Collazo (2008)
	Cualitativo	Ergonomía	Sharma (2012)

**Fuente:** elaboración propia.

En la Figura 1, se presenta la estructura de la taxonomía desarrollada en la presente investigación.





**Figura 1.** Estructura de la Taxonomía propuesta.

**Fuente:** elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una taxonomía para ser utilizada por los grupos de producción y calidad, para identificar y clasificar las causas de los errores humanos que afectan la calidad del producto. La taxonomía es congruente con el modelo dominante para el estudio de las causas raíz de los accidentes, “Queso Suizo” de Reason (1990). La estructura teórica de la taxonomía coincide con este modelo de la siguiente manera: la categoría de factores humanos directos que describe el error humano corresponde a las fallas activas; las de factores personales, factores organizacionales directos, factores organizacionales indirectos y factores técnicos corresponden a las fallas latentes.

Se encuentran coincidencias, con las categorías mutuamente excluyentes y de alto nivel, con las desarrolladas para el Sistema de Clasificación de Factores Humanos, aplicado por Shapell *et al.* (2007) para la industria de la aviación, específicamente, en la categoría de factores humanos directos, que describe el

error humano a partir de la taxonomía de Reason, fundamentada en el modelo Skill-Rule-Knowledge de Rasmussen (1981). Las categorías de factores personales y factores técnicos son equivalentes a la de precondiciones para actos inseguros de HFACS; mientras que las categorías de factores organizacionales corresponden a la de influencias organizacionales de HFACS.

Es importante mencionar que las categorías de factores humanos directos, factores personales, factores técnicos y factores organizacionales directos e indirectos fueron generados a partir del conocimiento de los miembros del grupo de producción y de calidad, integrados en su mayoría por supervisores con estudios de ingeniería, en la etapa III de la investigación.

Las cinco categorías constituyen la estructura general de la taxonomía, mismas que fueron identificadas a partir de los datos recopilados entre los miembros del grupo de producción y calidad y de los operadores multifuncionales. Por consiguiente, las categorías y factores que las integran reflejan el conocimiento que los participantes poseen respecto al error humano y sus causas en los fallos y defectos en la calidad del producto.

La taxonomía propuesta en esta investigación presenta coincidencia con el modelo de factores de conformación del rendimiento de Bubb (2005). El modelo presenta en dos grandes grupos los factores que influyen en la interacción del hombre y la máquina: los factores externos y los factores internos de conformación del rendimiento. Los factores externos del modelo de Bubb se dividen en prerequisites organizacionales, como la estructura y la dinámica organizacional, y en los prerequisites técnicos. En la taxonomía propuesta corresponden a los factores organizacionales externos e internos y a los factores técnicos. Asimismo, los factores internos de conformación del rendimiento conformados por las categorías de capacidades y preparación son equivalentes a los factores personales y factores humanos directos.

Las correspondencias de la taxonomía propuesta con HFACS y el modelo de factores de conformación del rendimiento de Bubb (2005) se presentan en la estructura general, pero difieren con los factores causales

(elementos taxonómicos). En HFACS describe la causalidad para los accidentes organizacionales en los sistemas de alto riesgo. El modelo de Bubb se acerca más a la taxonomía propuesta ya fue realizado en el contexto de la industria de manufactura de dispositivos electrónicos; mientras que en la taxonomía propuesta los factores describen las causas de los defectos en la calidad del producto específicamente en la industria de dispositivos médicos.

La taxonomía se integra por cinco categorías mutuamente excluyentes y de alto nivel, las cuales son factores humanos (error humano), factores personales, factores técnicos, factores organizacionales directos y factores organizacionales indirectos. Cada una de ellas presenta subcategorías, en el caso del error humano se encuentran deslices, lapsus, violaciones y equivocaciones, que corresponden precisamente a los tipos de error humano. En cuanto a factores personales son factores físicos, factores psicológicos y factores socioeconómicos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

El más profundo agradecimiento, respeto y admiración a la Dra. Rosa María Reyes Martínez por su guía, motivación y comentarios en la elaboración de este trabajo de investigación; así como por su disponibilidad para compartir su conocimiento y experiencia en el terreno académico. Asimismo, por brindarme en todo momento su gran calidad humana y de servicio.

A los profesionistas y trabajadores de la industria que participaron directa e indirectamente en esta investigación por compartir sus experiencias en el campo profesional e industrial y por ceder un espacio de su tiempo, especialmente al Ing. Miguel Ángel Félix Díaz Alonso, Ing. Elvia Hinojosa, Ing. Blanca Azucena Juárez Figueroa, Ing. Eduardo Venegas Contreras, al Ing. Ángel Francisco Medina Solorio e Ing. Pablo Andrés Ruelas Juárez; ya que sin su valiosa ayuda no hubiera sido posible realizar la investigación de campo en la industria.



Con respeto y gratitud a las autoridades de la Universidad Autónoma de Baja California, especialmente al Dr. Luis Enrique Palafox Maestre y al Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anders, R., Oravecz, Z., y Batchelder, W. H.** (2014). Cultural consensus theory for continuous responses: A latent appraisal model for information pooling. *Journal of Mathematical Psychology*, 61, 1-13. <https://pennstate.pure.elsevier.com/en/publications/cultural-consensus-theory-for-continuous-responses-a-latent-appra>
- Baber, C., y Stanton, N. A.** (1996). Human error identification techniques applied to public technology: predictions compared with observed use. *Applied ergonomics*, 27(2), 119-131. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00067-4)
- Báez, Y. A., Rodríguez, M. A., De la Vega, E. J., y Tlapa, D. A.** (2013). Factores que influyen en el error humano de los trabajadores en líneas de montaje manual. *Información tecnológica*, 24(6), 67-78. [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0718-07642013000600010&lng=pt&nrm=iso](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-07642013000600010&lng=pt&nrm=iso)
- Baker, P. D., y Krokos, J. K.** (2007). Development and Validation of Aviation Causal Contributors for Error Reporting System (ACCERS). *Human Factors*, 49(2), 185-199. <https://doi.org/10.1518/001872007X312432>
- Boster, J. S.** (1986). Exchange of varieties and information between Aquaruna manioc cultivators. *American Anthropologist*, 88, 428-436. <https://doi.org/10.1525/aa.1986.88.2.02a00100>

- Brito, S., Hernández, A., Montero, R., Casares, R., y Martínez, R.** (2011). El estudio del error humano en la industria biofarmacéutica. *Ação Ergonômica*, 6, 31. [https://www.researchgate.net/publication/272179826\\_EL\\_ESTUDIO\\_DEL\\_ERROR\\_HUMANO\\_EN\\_LA\\_INDUSTRIA\\_BIOFARMACEUTICA](https://www.researchgate.net/publication/272179826_EL_ESTUDIO_DEL_ERROR_HUMANO_EN_LA_INDUSTRIA_BIOFARMACEUTICA)
- Bubb, H.** (2005). Human Reliability: A key to improved quality in manufacturing. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 15(4), 353-368. <https://doi.org/10.1002/hfm.20032>
- Caulkins, D. D.** (2004). Identifying culture as a threshold of shared knowledge: A consensus analysis method. *International Journal of Cross Cultural Management*, 4(3), 317-333. <https://doi.org/10.1177/1470595804047813>
- Collazo, G.** (2008). *Error Humano: C4c06. Modelo de Determinación de Raíz Causa*.
- Collins, C. C., y Dressler, W. W.** (2008). Cultural consensus and cultural diversity: A mixed methods investigation of human service providers' models of domestic violence. *Journal of Mixed Methods Research*, 2(4), 362-387. <https://doi.org/10.1177/1558689808322766>
- Douglas L., y Hansen T.** (2003). Los orígenes de la industria maquiladora en México. *Comercio Exterior*, 53(11). <http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/59/7/RCE.pdf>
- Drury, C. G.** (2002). Visual inspection reliability: What we know and why we need to know it. In *16th Human Factors in Aviation Maintenance Symposium*, 4-11.
- Drury, C. G., y Watson, J.** (1999). *Human factors good practices in fluorescent penetrant inspection*. [https://www.researchgate.net/profile/Colin-Drury/publication/267548062\\_GOOD\\_PRACTICES\\_IN\\_VISUAL\\_INSPECTION/links/545ce2fc0cf295b5615e60c1/GOOD-PRACTICES-IN-VISUAL-INSPECTION.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Colin-Drury/publication/267548062_GOOD_PRACTICES_IN_VISUAL_INSPECTION/links/545ce2fc0cf295b5615e60c1/GOOD-PRACTICES-IN-VISUAL-INSPECTION.pdf)
- Fujita, Y., y Hollnagel, E.** (2004). Failures without errors: quantification of context in HRA. *Reliability Engineering & System Safety*, 83(2), 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.res.2003.09.006>

- Haug, A., Zachariassen, F., y van Liempd, D.** (2011). The costs of poor data quality. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(2), 168-193. <http://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/232>
- Hawkins, F. H.** (1993). *Human Factors in Flight*. Orlady. HW Aldershot: Ashgate.
- Kumar, R., Kumar, D., y Kumar, P.** (2007). FM- a pragmatic tool to model, analyse and predict complex behavior of industrial systems. *Engineering Computations*, 24(4), 319 - 346. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02644400710748670/full/html>
- Layer, J. K., Karwowski, W., y Furr, A.** (2009). The effect of cognitive demands and perceived quality of work life on human performance in manufacturing environments. *International journal of industrial ergonomics*, 39(2), 413-421. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.10.015>
- Le, Y., Qiang, S., y Liangfa, S.** (2012). A novel method of analyzing quality defects due to human errors in engine assembly line. In *2012 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 3, 154-157. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2012.6339943>
- Lin, L., Drury C. G., y Kim S. W.** (2001). Ergonomics and Quality in Paced Assembly Lines. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 11(4) 377–382. <https://doi.org/10.1002/hfm.1020>
- Liu, H., Hwang, S. L., y Liu, T. H.** (2009). Economic assessment of human errors in manufacturing environment. *Safety Science*, 47(2), 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.04.006>
- Lopes, M. E. R. F., y Forster, C. H. Q.** (2013). Application of human error theories for the process improvement of Requirements Engineering. *Information Sciences*, 250, 142-161. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.07.010>
- Martínez, A.** (2012). Gestión sistémica del error: El enfoque del queso suizo en las auditorías. *Innotec Gestión*, 4, 13-21. <https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC-Gestion/article/view/164>

- Miralles, C., Holt, R., Marin-Garcia, J., y Canos-Daros, L.** (2011). Universal design of workplaces through the use of Poka-Yokes: Case study and implications. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(3), 436-452. <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/420/207>
- Moray, N., y Senders, J. W.** (1991). *Human Error: Cause, Prediction, and Reduction: Analysis and Synthesis*. L. Erlbaum Associates.
- Murguía, R. Á. P., del Pino, E. M. V. G., y Villa, Y. B.** (2013). El análisis de fiabilidad humana en la mejora de procesos. *Prospectiva*, 11(2), 61-67. <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496250736008.pdf>
- Muxfeldt, A., y Steil, J.** (2018). Recovering from assembly errors by exploiting human demonstrations. *Procedia CIRP*, 72, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.026>
- Myszewski, J. M.** (2010). Mathematical model of the occurrence of human error in manufacturing processes. *Quality and Reliability Engineering International*, 26, 845–851. <https://doi.org/10.1002/qre.1162>
- Neumann, W. P., Kolus A., y Wellss R. W.** (2016). Human Factors in Production System Design and Quality Performance – A Sistematic Review. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1721- 1724. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.830>
- Paun, A., Sergiu, D., Vladut, V., y Gageanu, P.** (2011). Reducing the time consuming “coming back” in manufacturing process by using the anti-error systems. Annals of Faculty Engineering Hunedoara. *International Journal of Engineering*, Tomo IX(3), 319-322.
- Power, C. y Fox, J.** (2014). Comparing the comprehensiveness of three expert inspection methodologies for detecting errors in interactive systems. *Safety Science*, 62, 286-294. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.08.003>

- Qeshmy, D. E., Makdisi, J., da Silva, E. H. D. R., y Angelis, J.** (2019). Managing Human Errors: Augmented Reality systems as a tool in the quality journey. *Procedia Manufacturing*, 28, 24-30. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.005>
- Rasmussen, J., Pedersen, O. M., Mancini, G., Carnino, A., Griffon, M., y Gagnolet, P.** (1981). *Classification system for reporting events involving human malfunctions*. Risø National Laboratory. RisøM, (2240).
- Razak, I. H. A., Kamaruddin, S., y Azid, I. A.** (2008). Development of human reliability model for evaluating maintenance workforce reliability: a case study in electronic packaging industry. In *2008 33rd IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Conference (IEMT)* (pp. 1-7). IEEE.
- Reason, J.** (1990). *Human Error*. Cambridge University Press.
- Reason, J.** (2016). *Managing the risks of organizational accidents*. Routledge.
- Refflinghaus, R., y Kern, C.** (2018). On the track of human errors-Procedure and results of an innovative assembly planning method. *Procedia Manufacturing*, 21, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.106>
- Righi, C., James, J., Beasley, M., Day, D. L., Fox, J. E., Gieber, J. Howe, C., y Ruby, L.** (2013). Card sort analysis best practices. *Journal of Usability Studies*, 8(3), 69-89. <https://uxpajournal.org/card-sort-analysis-best-practices-2/>
- Robaina, A., Ávila, R., y Sevilla, M.** (2003). Cuestionario de percepción de Accidentes de Trabajo. *Revista Cubana de Salud y Trabajo*, 4, 13-16.
- Romney, A. K.** (1999). 2 *Cultural Consensus as a Statistical Model*. (S1), S93-S115.
- Romney, A. K., Batchelder, W. H., y Weller, S. C.** (1987). Recent applications of cultural consensus theory. *American Behavioral Scientist*, 31(2), 163-177. <https://doi.org/10.1177/000276487031002003>

- Romney, A. K., Weller, S. C., y Batchelder, W. H.** (1986). Culture as consensus: A theory of culture and informant accuracy. *American anthropologist*, 88(2), 313-338. <https://www.jstor.org/stable/677564?seq=1>
- Ross, A. J., Wallace, B, y J. B. Davies A. J.** (2004). Technical note: measurement issues in taxonomic reliability. *Safety Science*, 42,771–778. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2003.10.004>
- Ruckart, P. Z., y Burgess, P. A.** (2007). Human error and time of occurrence in hazardous material events in mining and manufacturing. *Journal of hazardous materials*, 142(3), 747-753. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.117>
- Ruiz-Moreno, J. M., y Trujillo, H. M.** (2012). Modelos para la evaluación del error humano en estudios de fiabilidad de sistemas. *Anales de psicología*, 28(3), 963-977. <https://www.redalyc.org/pdf/167/16723774036.pdf>
- Salas-Arias, K. M., Madriz-Quirós, C. E., Sánchez-Brenes, O., Sánchez-Brenes, M., y Hernández-Granados, J. B.** (2018). Factores que influyen en errores humanos en procesos de manufactura moderna. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 22-34. [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/3494](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/3494)
- Shappell, S., Detwiler, C., Holcomb, K., Hackworth, C., Boquet, A., y Wiegmann, D. A.** (2007). Human error and commercial aviation accidents: an analysis using the human factors analysis and classification system. *Human Factors*, 43(2), 227–242. <https://doi.org/10.1518/001872007X312469>
- Sharma, R.** (2012). Conceptual framework for improving business performance with lean manufacturing and successful human factors interventions—a case study. *International Journal for Quality Research*, 6(3), 259-270. <http://www.ijqr.net/paper.php?id=103>
- Sylla, C., y Drury, C.** (1995). Signal detection for human error correction in quality control. *Computers in Industry*, 26, 147-159. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)00033-M](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)00033-M)

- Taylor-Adams, S., y Kirwan, B.** (1997). Human reliability data requirements. *Disaster Prevention and Management*, 6(5), 318-335.
- Torres, Y., Nadeau, S., y Landau, K.** (2019). *Application of human errors analysis in manufacturing: a proposed intervention framework and techniques selection*. <https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/18204/1/Nadeau%20S%202019%2018204%20Application%20of%20human%20errors%20analysis.pdf>
- Wang, K. S.** (2013). Towards zero -defect manufacturing (ZDM)- a data mining approach. *Advances in Manufacturing*, 1(1), 62-74. <https://doi.org/10.1007/s40436-013-0010-9>
- Wang, W., y Zhao, T.** (2010). The application of CREAM based on HAZOP analysis in using process of system. In *2010 Proceedings-Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Weller, S. C.** (2007). Cultural consensus theory: Applications and frequently asked questions. *Field methods*, 19(4), 339-368. <https://doi.org/10.1177/1525822X07303502>
- Weller, S.C., y Romney, A. K.** (1988). *Systematic Data Collection*. Sage.
- Yu, F. J., Hwang, S. L., Huang, Y. H., y Lee, J. S.** (2000). Application of human error criticality analysis for improving the initiator assembly process. *International journal of industrial ergonomics*, 26(1), 87-99. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(00\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(00)00004-4)

/05/



# IMPLEMENTATION OF POWER-EFFICIENT CONTROL UNIT ON ULTRA-SCALE FPGA FOR GREEN COMMUNICATION

**Bishwajeet Pandey**

Centre of Energy Excellence, Gyancity Research Labs.

Motihari, (India).

E-mail: [gyancity@gyancity.com](mailto:gyancity@gyancity.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9674-3586>

**Keshav Kumar**

Centre of Energy Excellence, Gyancity Research Labs.

Motihari, (India).

E-mail: [keshav@gyancity.com](mailto:keshav@gyancity.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2310-5468>

**Aiza Batool**

Sapienza University of Rome.

Rome, (Italy).

E-mail: [aizabatool@gmail.com](mailto:aizabatool@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5650-3609>

**Shabeer Ahmad**

Gran Sasso Science Institute.

L'aquila, (Italy).

E-mail: [shabeer.ahmad@gssi.it](mailto:shabeer.ahmad@gssi.it) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2951-2259>

**Recepción:** 10/11/2020 **Aceptación:** 29/01/2021 **Publicación:** 15/03/2021

## Citación sugerida:

Pandey, B., Kumar, K., Batool, A., y Ahmad, S. (2021). Implementation of power-efficient control unit on ultra-scale FPGA for green communication. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 10(1), 93-105. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2021.v10n1e37.93-105>

## ABSTRACT

Whole world is suffering from the problem of the energy crisis. This is happening because of the enormous growth of population and industries across the globe. Therefore the whole world is looking to adopt the concepts of green communication technologies and power/energy efficient devices. This work is just towards these technologies. In this work, a power-efficient Control Unit (CU) is designed and implemented on Kintex-7 Ultrascale FPGA. The simulation and power analysis of the control unit is done on VIVADO HLx Design Suite. The power analysis of control unit is observed for different frequency values and it is observed that as the frequency increases the total power consumption also increases. Hence the control unit is more suitable to operate at low frequency values in order to minimize the power consumption. Also, there is a 36% saving in total power consumption when we scale down the device operating frequency of the control unit from 5 GHz to 100 MHz.

## KEYWORDS

FPGA, Control Unit, Green Communication, Power Analysis, VIVADO.

## 1. INTRODUCTION

The rapid extent of the population and the evolution of industrialization across the globe have led to several problems for the shortage of the Earth's natural resources (Mahapatra *et al.*, 2015; Pietrosemoli & Rodríguez-Monroy, 2019). Therefore people are getting more concerned about saving these resources for the future generation. This can be accomplished using green communication technologies and energy/power-efficient devices (Kumar, Pandey, & Mohamed, 2019a; Kumar *et al.*, 2019b).

This work is a step towards the idea to promote the technologies of green communication and energy/power-efficient devices. In this work, a Control Unit (CU) is implemented on FPGA to minimize the power consumption. With the help of various Low Voltage CMOS (LVCMOS) technology, Input/output (I/O) standards researchers have designed a power-efficient CU on Artix-7 FPGA (Kumar, Pandey, & Hussain, 2019c).

I/O standards are used to minimize power consumption by matching the input and output impedance. A power-efficient CU is designed by authors on Artix-7 FPGA by changing its frequency values. With the change in frequency values the power consumption of the CU with FPGA device changes (Kumar *et al.*, 2019d). Stub Series Terminated Logic (SSTL) I/O Standards are used by researchers to improve the power consumption of CU on 40 nm Virtex-6 FPGA. SSTL I/O standards match the impedance of input load w.r.t to the output load, so that power consumption gets reduced (Chaturvedi, Kaushik, & Baggan, 2019).

An electronic CU is designed by authors on FPGA for controlling the vehicles' system. The Reduced Instruction Set Computer (RISC) Machine (ARM) processor is used along with FPGA for computing parallel tasks (Pérez *et al.*, 2019). To promote the ideas of green communication researchers have implemented a power-efficient CU on Virtex and Spartan family's FPGA (Pandey, 2020). An energy-efficient CU is designed by authors with the help of HSTL and HSUL I/O standard for green communication on 28nm Artix-7 FPGA devices (Kumar, Pandey, & Chaturvedi, 2019e). An energy-

efficient instruction register is designed by authors for integrating the green communication on Virtex 4, Virtex 5, and Virtex 6 FPGA (Siddiquee *et al.*, 2019). Therefore it has been observed that a lot of work has been done for incorporating the ideas of green communication and energy/power-efficient devices for future generation on CU with various FPGAs, but there is no such work is done on implementing the CU circuit on Kintex-7 ultrascale FPGA, hence in this work, the CU circuit is being designed on Kintex-7 ultrascale FPGA for promoting the techniques of green communication.

## 2. METHODOLOGY

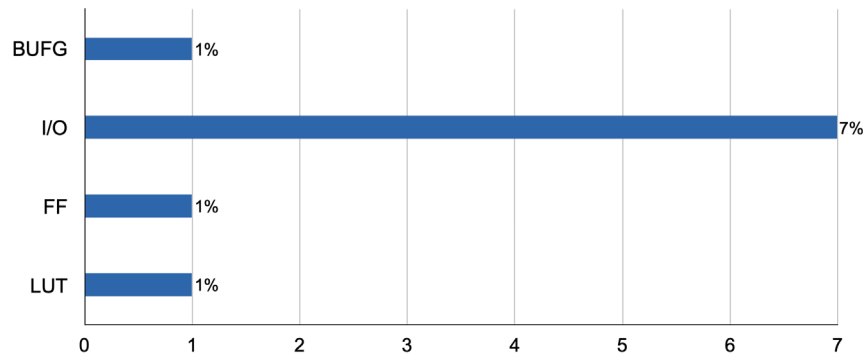
The implementation setup for CU is done on the Ultra scale Kintex-7 FPGA board. The platform used for simulation of CU on the FPGA board is the VIVADO HLx design suite (Kumar *et al.*, 2019f). For implementing CU on Ultra scale Kintex-7 FPGA board, the FPGA resources utilized are such as Lookup Tables (LUTs), Flip-flops (FF), Input-Output (IO), and Global Buffers (BUFGs) which are shown in Table 1 and Figure 1.

**Table 1.** FPGA resource utilization for implementing CU.

RESOURCE	UTILIZATION	AVAILABLE	UTILIZATION %
LUT	14	203128	0.01
FF	4	406256	0.01
IO	23	312	7.37
BUFG	1	480	0.21

**Source:** own elaboration.

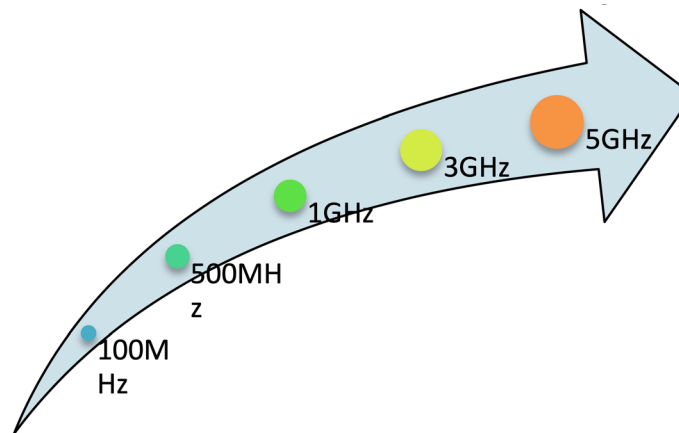
The utilization of LUTs are 14 whereas 203128 LUTs are available on FPGA boards for designing CU. Similarly, the utilization FF, IO, and BUFG are 4, 23, and 1 respectively for designing CU on the ultrascale Kintex-7 FPGA.



**Figure 1.** FPGA resource utilization for implementing CU.

**Source:** own elaboration.

The power analysis of CU for making it energy/power-efficient is done for various frequency values such as 100MHz, 500MHz, 1GHz, 3GHz, and 5GHz which is shown in Figure 2.



**Figure 2.** Frequency Values for Power Analysis.

**Source:** own elaboration.

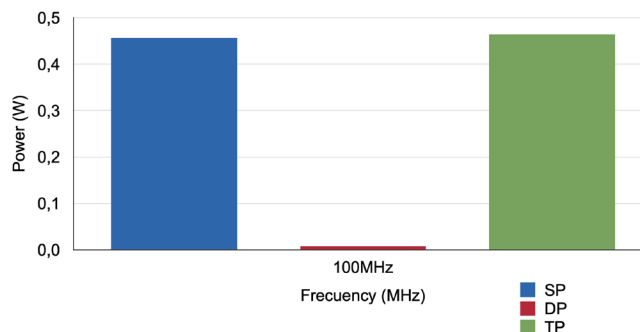
### 3. RESULTS

The power calculation of CU with the ultrascale Kintex-7 FPGA is associated with FPGA device Dynamic Power (DP) and Static Power (SP) (Pandey, 2019). The total power consumption is the sum of both dynamic and static power. The dynamic power is the leakage power dissipation of the device. The static power is the summation of device I/O, Logic (L/G), Signal (S/G), and Clock (Ck) power.

$$\text{Total Power (TP)} = \text{DP} + \text{SP}$$

#### 3.1. POWER ANALYSIS OF 100 MHZ FREQUENCY

When the frequency of CU is set to 100 MHz then the power consumption is 99% for SP that is 0.457 W and DP consumption is 1% that is 0.007 W. Therefore the device TP consumption is 0.464 W. The TP at 100 MHz is represented in Figure 3.



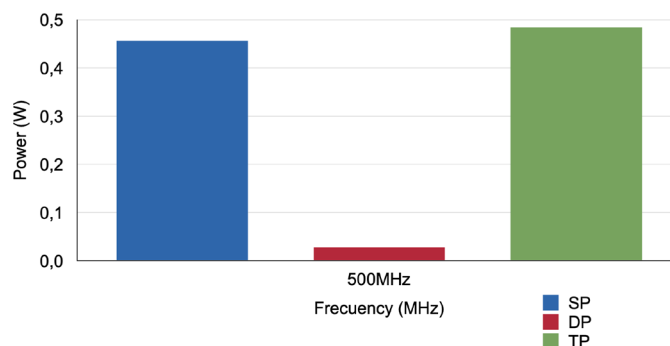
**Figure 3.** Power Consumption for 100 MHz.

**Source:** own elaboration.

#### 3.2. POWER ANALYSIS OF 500 MHZ FREQUENCY

When the frequency is tuned to 500 MHz, the total power consumption of CU on the FPGA board is 0.485 W. The TP consumption is the summation of device SP and DP. For the frequency of 500 MHz,

the SP consumption is 0.457 W whereas DP consumption is 0.028 W. The power consumption for the frequency of 500 MHz is described in Figure 4.

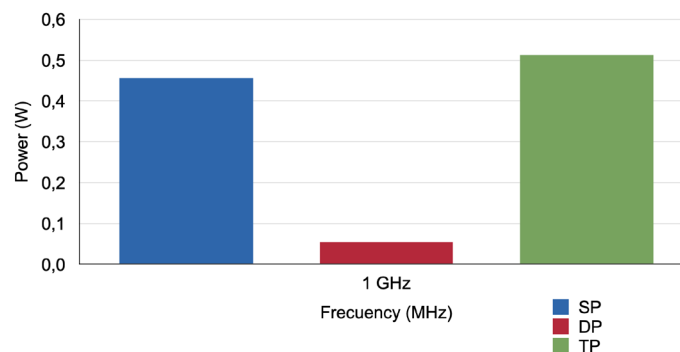


**Figure 4.** Power Consumption for 500 MHz.

**Source:** own elaboration.

### 3.3. POWER ANALYSIS OF 1 GHZ FREQUENCY

When the frequency of CU is tuned to 1 GHz then the power consumption is 89% for SP that is 0.457W and DP consumption is 11% that is 0.054W. Therefore the device TP consumption is 0.512 W. The TP at 100MHz is represented in Figure 5.

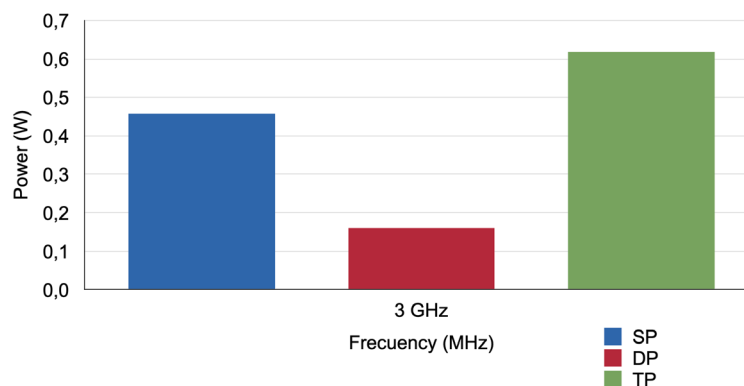


**Figure 5.** Power Consumption for 1 GHz.

**Source:** own elaboration.

### 3.4. POWER ANALYSIS OF 3 GHZ FREQUENCY

When the frequency is tuned to 3 GHz, the total power consumption of CU on the FPGA board is 0.618 W. The TP consumption is the summation of device SP and DP. For the frequency of 3 GHz, the SP consumption is 0.458 W whereas DP consumption is 0.160 W. The power consumption for the frequency of 3 GHz is described in Figure 6.



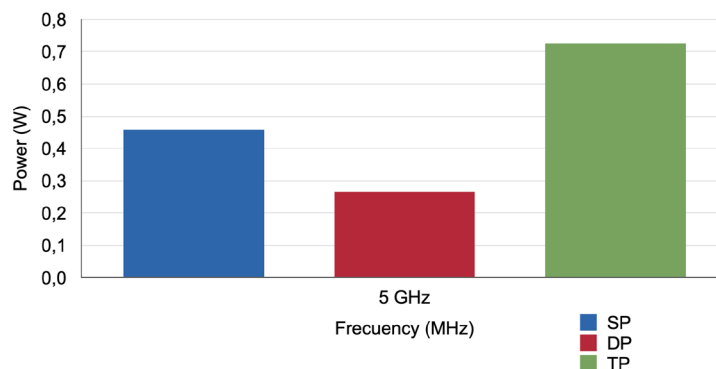
**Figure 6.** Power Consumption for 3 GHz.

**Source:** own elaboration.

### 3.5. POWER ANALYSIS OF 5 GHZ FREQUENCY

When the frequency is tuned to 5 GHz, the total power consumption of CU on the FPGA board is 0.725 W. The TP consumption is the summation of device SP and DP. For the frequency of 5 GHz, the SP consumption is 0.459 W whereas DP consumption is 0.266 W. The power consumption for the frequency of 5 GHz is described in Figure 7.





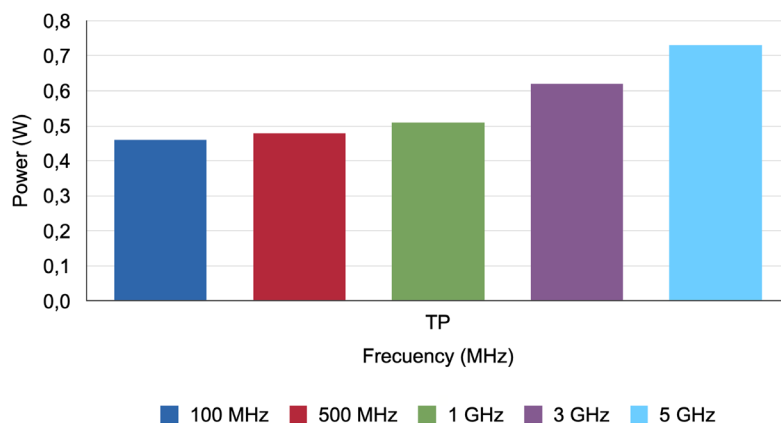
**Figure 7.** Power Consumption for 5 GHz.

**Source:** own elaboration.

## 4. OBSERVATIONS AND DISCUSSION

From the power analysis (section), it is being observed that as the frequency of operation of FPGA devices gets increased there is decrement in the SP of device for CU implementation and there is an increment if device DP for CU implementation. Therefore the TP gets increased, when the frequency gets increased.

The TP consumption is found minimum for 100 MHz frequency whereas the TP consumption is found maximum for 5 GHz frequency. There is an increment of 4.52% in TP consumption, when the frequency value is tuned to 500 MHz from 100 MHz. Also, there is an increment of 10.34 %, 33.18%, and 56.25% in TP consumption, when the frequency value is tuned to 1 GHz, 3 GHz, and 5 GHz from 100 MHz. The total power of the control unit on an FPGA device for all frequency values are shown in Figure 8.



**Figure 8.** Total Power Consumption of CU on FPGA device.

**Source:** own elaboration.

## 5. CONCLUSION AND FUTURE SCOPE

The step towards green communication is very important in this era, because energy crisis is seen everywhere across the globe. Therefore from this research work, it has been tried to make some steps towards promoting the principles of green communication and power-efficient devices. In this work, the implementation of CU is done on Kintex-7 ultrascale FPGA, and the simulation of CU circuit, resources utilization, and power analysis is observed on VIVADO Hlx Design Suite.

The power consumption of CU on FPGA devices is analyzed for five different sets of frequency values such as 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, 3 GHz, and 5 GHz. It is observed that the power consumption increases as the value of frequency increases. Therefore it can be concluded that lower the frequency value lower the total power consumption. The CU circuit consumes the least amount of power for 100 MHz frequency.

As future scope is concerned, this CU circuit can be analyzed for other ultra-scale and ultrascale plus FPGA devices. Not only this other power-efficient techniques such as voltage, current, and capacitance scaling techniques can be applied to the CU circuit. Impedance matching techniques with the help of I/O standards can also be applied to make circuit energy-efficient. Later this FPGA design can be converted to ASIC designs for better performance.

## REFERENCES

- Chaturvedi, S. P., Kaushik, A., & Baggan, V.** (2019). Power Efficient Control Unit Design Using 40nm Field Programmable Gate Array. *International Journal of Advanced Science and Technology*, (19), 694 – 709. <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/2654>
- Kumar, K., Pandey, P., & Mohamed, R. R.** (2019a). *HSTL and HSUL I/O Standard Based Energy-Efficient Control Unit Circuit Design on FPGA*. [http://gjecs.gyancity.com/Vol4No2/GJECS\\_42003.pdf](http://gjecs.gyancity.com/Vol4No2/GJECS_42003.pdf)
- Kumar, K., Ahmad, S., Pandey, B., Pandit, A. K., Singh, D., & Akbar, D. M.** (2019b). Power Efficient Frequency Scaled and ThermalAware Control Unit Design on FPGA. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(9 Special Issue 2), 530-533.
- Kumar, K., Pandey, B., & Hussain, D. A.** (2019c). Power Efficient UART Design Using Capacitive Load on Different Nanometer Technology FPGA. *Gyancity Journal of Engineering and Technology*, 5(2).
- Kumar, K., Pandey, B., & Hussain, D. M. A.** (2019d). Effect of Frequency on Energy Efficient Transceiver Design. *Gyancity Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 14-18. <https://doi.org/10.21058/gjet.2019.52002>
- Kumar, K., Pandey, B., & Chaturvedi, S. P.** (2019e). Frequency Scaled Green Data Flip Flop on Different Nanometer Technology Based FPGA. *Gyancity Journal of Electronics and Computer Science*, 4(1), 1-7.

- Kumar, K., Pandey, B., Hussian, D. M. A., Bhutto, A., Pandit, A. K., & El-Ebiary, Y. A. B.** (2019f). Design of Energy Efficient Control Unit and Implementation on High Performance FPGA. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(12S2).
- Mahapatra, R., Nijasure, Y., Kaddoum, G., Hassan, N. U., & Yuen, C.** (2015). Energy efficiency tradeoff mechanism towards wireless green communication: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 686-705.
- Pandey, B., Kumar, K., Haryanti, S. C., Mohamed, R. R., & Hussian, D. A.** (2020). *Power Efficient Control Unit for Green Communication*.
- Pandey, B., Pandey, N., Kaur, A., Hussain, D. A., Das, B., & Tomar, G. S.** (2019). Scaling of output load in energy efficient FIR filter for green communication on ultra-scale FPGA. *Wireless Personal Communications*, 106(4), 1813-1826. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-018-5717-2>
- Pérez, J., Alcázar, M., Velasco, J. M., Cabrera, J. A., & Castillo, J. J.** (2019). Low-Cost FPGA-Based Electronic Control Unit for Vehicle Control Systems. *Sensors*, 19(8), 1834. <https://doi.org/10.3390/s19081834>
- Pietrosemoli, L., & Rodríguez-Monroy, C.** (2019). The Venezuelan energy crisis: Renewable energies in the transition towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 415-426. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v105y2019icp415-426.html>
- Siddiquee, M. T., Kumar, K., Pandey, P., & Kumar, A.** (2019). Energy Efficient Instruction Register for Green Communication. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 8(2S2). <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v8i2s2/B10650182S219.pdf>



