



ISSN: 2992-7447

Año 5. Vol. 3 Núm. 2 Julio - Diciembre 2025

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México



**Aplicación de la estandarización del trabajo
para evaluar la productividad y calidad
en un proceso de manufactura de cintos
de piel**

**Importancia del acceso a la información
del consumo de energía en hogares alemanes,
mexicanos y rusos**

**Implementación de autómatas celulares en
una tarjeta FPGA**

**Desempeño sísmico de edificios de concreto
reforzado estructurados a base de marcos
resistentes a momento y contravientos
restringidos al pandeo**

**Diseño y validación de una estación
meteorológica autónoma de bajo costo para el
sector cañero**





Universidad Autónoma del Estado de México

Consejo Editorial

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Directora: Dra. Rosa María Valdovinos Rosas ORCID 0000-0001-9954-0653
Editora técnica: Dra. Mireya Salgado Gallegos ORCID 0000-0003-2675-9456
Editor técnico: Dr. Javier Salas García ORCID 0000-0002-1297-7893

Universidad Católica de Murcia, España

Editora científica: Dra. Angélica Guzmán Ponce ORCID 0000-0002-7844-1266

Comité Científico

Ingeniería y tecnología civil y en arquitectura

Dr. Francisco Héctor Bañuelos García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-8231-6599
Dr. Héctor Rodrigo Amezcua Rivera – Facultad de Ingeniería UNAM, México ORCID 0000-0002-5991-0020
Dr. Marco Antonio Escamilla García – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México ORCID 0000-0001-5276-4369

Ingeniería y tecnología en Ciencias Computacionales e Inteligencia Artificial

Dra. Juana Canul Reich – Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México ORCID 0000-0003-1893-1332
Dr. Daniel Valero Carreras – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0002-9025-9950
Dr. Antonio Jesús Banegas Luna – Universidad Católica de Murcia, España ORCID 0000-0003-1158-8877

Ingeniería y tecnología en Mecánica y Sistemas Energéticos

Dra. María Dolores Durán García – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-7569-249X
Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera – Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México ORCID 0009-0008-9460-2251

Ingeniería y tecnología en Ciencias del Agua

Dr. Juan Manuel Esquivel Martínez – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0003-1864-4501
Dra. Edith Rosalba Salcedo Sánchez – Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-2559-5306
Dra. Laura Conde Baéz – Universidad Autónoma de Guerrero, México ORCID 0000-0003-0250-7916

Ingeniería y tecnología en Cadena de Suministro

Dra. Lourdes Loza Hernández – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0001-5107-7110
Dr. Manuel González de la Rosa – Tecnológico Nacional Campus Toluca, México ORCID 0009-0000-6558-6493
Dr. Agustín Bustos Rosales – Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, México ORCID 0000-0001-5074-0355
Dr. Rodolfo Mendoza Gómez – Tecnológico de Monterrey Campus León, México ORCID 0000-0002-9119-3412

Ingeniería y tecnología en Robótica, Mecatrónica, Industria 4.0 y Biomédica

Dr. Juan Manuel Jacinto Villegas – Universidad Autónoma del Estado de México, México ORCID 0000-0002-0964-4844
Dra. Nadia Vanessa García Hernández – CINVESTAV, Unidad Saltillo, México ORCID 0000-0003-1944-0519
Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González – Instituto Tecnológico de Orizaba, México ORCID 0000-0002-0309-5231
En cada número de la revista se cuenta con un editor invitado adscrito a una institución de educación superior de prestigio.

Editora Invitada

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar

Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón Purísima de Bustos, Guanajuato, México

IDEAS EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, Año 5 , Vol. 3, Núm. 2, 2025, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma del Estado de México, Instituto Literario 100 Ote., Colonia Centro, Toluca, Estado de México, C.P. 50000, Tels. 7222-14-08-55, <https://hemeroteca.uaemex.mx/index.php/ideasingeneria>, ideasencienciai_fi@uaemex.mx. Directora: Rosa María Valdovinos Rosas, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Cerro de Coatepec s/n, Toluca, Estado de México, C.P. 50130, Tel. 7222140855. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo no. 04-2023-033108322300-102, ISSN: 2992-7447, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsables de la última actualización de este número, Mireya Salgado Gallegos y Javier Salas García, Facultad de Ingeniería. Diseño de portada y Diseño Editorial, Javier Salas García. Fecha de última modificación: 26 de junio de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido aquí publicado sin fines de lucro, siempre y cuando no se modifique, se cite la fuente completa y su dirección electrónica en términos de licencia aplicable. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC).

Hecho en México, Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMEX), 2025.



CONTENIDO

Pág.

Carta de la Editora

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar

4

Aplicación de la Estandarización del Trabajo para Evaluar la Productividad y Calidad en un Proceso de Manufactura de Cintos de Piel

6

Mares-Castro, A.; Gómez-Armenta, J.R.; Arellano-Márquez, Y.Y.

Importancia del Acceso a la Información del Consumo de Energía en Hogares Alemanes, Mexicanos y Rusos

22

Aguero-Shkurenkov, A; Weber, B.

Implementación de Autómatas Celulares en una Tarjeta FPGA

42

González-Contreras, J; Jiménez-López, E; Lozoya-Ponce, R. E; Villagrán-Ruiz, J. C

Desempeño Sísmico de Edificios de Concreto Reforzado Estructurados a Base de Marcos Resistentes a Momento y Contravientos Restringidos al Pandeo

58

Félix Soto, A; Reyes Salazar, A; Santos Amador, O; Llanes Tizoc, M. D; Trasviña Soberanes, J. D; Valenzuela-Beltrán, F.

Diseño y Validación de una Estación Meteorológica Autónoma de Bajo Costo para el Sector Cañero

Cárdenas Magaña, JA

77

Carta del Editora

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar



En un mundo enfrentado a crisis energéticas, desastres naturales y demandas de eficiencia industrial, la investigación científica se convierte en un hito de soluciones prácticas. La excelencia en investigación se mide por la capacidad de transformar teorías en aplicaciones reales. Es de suma importancia el poder ver que la investigación tiene impacto en nuestra sociedad y atiende a problemáticas actuales en diferentes rubros, como lo es la industrial, el medioambiente, el sector salud y la educación.

En este número comenzamos con el artículo **"Aplicación de la Estandarización del Trabajo para Evaluar la Productividad y Calidad en un Proceso de Manufactura de Cintos de Piel"** de Mares-Castro et al., donde se propone una metodología basada en *Lean Manufacturing* para optimizar procesos en una empresa certificada ISO 9001:2015. Los resultados muestran un incremento del 56% al 68% en la calidad y una reducción significativa de rechazos, demostrando cómo la estandarización puede ser clave en la mejora continua.

En el ámbito energético, Agüero-Shkurenkov y Weber exploran en **"Importancia del acceso a la información del consumo de energía en hogares alemanes, mexicanos y rusos"** las diferencias en la disponibilidad y calidad de datos sobre el consumo energético en tres países. Este estudio subraya la importancia de tener una propuesta para la definición de estándares e indicadores base para procesos de manufactura que inician en ciclos de mejora continua.

González-Contreras et al. presentan en **"Implementación de Autómatas Celulares en una Tarjeta FPGA"** un enfoque innovador para modelar sistemas dinámicos mediante hardware reconfigurable. Su trabajo destaca el potencial de los autómatas celulares en aplicaciones como la criptografía y la simulación de sistemas distribuidos, aprovechando la capacidad de procesamiento paralelo de las FPGAs.

En el campo de la ingeniería estructural, Félix Soto et al. abordan en **"Desempeño Sísmico de Edificios de Concreto Reforzado Estructurados a Base de Marcos Resistentes a Momento y Contravientos Restringidos al Pandeo"** la evaluación de pérdidas económicas en edificios sometidos a sismos. Utilizando metodologías avanzadas como el FEMA P-58, los autores proponen diseños más resilientes para zonas de alto riesgo sísmico, como la Ciudad de México.

Finalmente, Cárdenas Magaña describe en **"Diseño y Validación de una Estación Meteorológica Autónoma de Bajo Costo para el Sector Cañero"** un prototipo accesible y preciso para el monitoreo climático en entornos agrícolas. Con un margen de error mínimo y alimentación solar, el prototipo demostró ser preciso, energéticamente eficiente y de bajo costo, constituyendo una alternativa viable y escalable frente a estaciones meteorológicas comerciales para el monitoreo climático en entornos agrícolas.

En conjunto, estos artículos reflejan cómo la investigación aplicada puede generar impactos tangibles en la industria, la sociedad y el medio ambiente. Invitamos a los lectores a reflexionar sobre el papel de la tecnología como catalizador de soluciones innovadoras y a explorar nuevas fronteras en sus respectivas disciplinas.

Atentamente,

Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar
Editora Invitada
"Ideas en Ciencias de la Ingeniería"

BIOGRAFÍA DE LA EDITORA

La Dra. Lucero de Montserrat Ortiz Aguilar es Ingeniera en Sistemas Computacionales y Doctora en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de León. Actualmente, es Profesora de Tiempo Completo en el Tec de Purísima del Rincón, adscrita al departamento de Sistemas Automotrices. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SIN-C, 2022-2025), cuenta con el reconocimiento al Perfil Deseable (PRODEP, 2023-2025) y es miembro adherente de la Academia Mexicana de Computación.

Sus líneas de investigación incluyen Inteligencia Artificial, Electromovilidad, Robótica y Optimización. Ha liderado y colaborado en más de 5 proyectos financiados por el TecNM e IDEA GTO, impulsando la investigación aplicada en la industria automotriz. Además, ha dirigido 5 tesis de licenciatura, 20 residencias profesionales y coordinado 10 estudiantes de servicio social, integrándolos en proyectos de alto impacto.

Su labor en divulgación científica incluye participación en más de 4 ferias municipales, programas de televisión INGENIOS y publicaciones en periódicos. También ha promovido la inclusión de niñas en STEM mediante más de 10 talleres de robótica y programación. Ha organizado El primer simposio para la carrera de Sistemas Automotrices, semanas tecnológicas en el ITSPR y 1 coloquio, además de impulsar la mejora curricular de la carrera de ISAU, contribuyendo a su acreditación en 2022.

En el ámbito académico, ha desempeñado funciones de liderazgo como secretaria y presidenta de la academia de Sistemas Automotrices entre 2022 y 2024. Por su impacto en la educación, recibió en 2024 el reconocimiento estatal "Docente que Transforma la Educación" y forma parte del programa "Mujeres Impulsoras de Mentefactura". En 2025 obtuvo el reconocimiento al Premio Estatal al Merito Laboral, por parte del gobierno del estado de Guanajuato por su proyecto ComposTEC.

Aplicación de la Estandarización del Trabajo para Evaluar la Productividad y Calidad en un Proceso de Manufactura de Cintos de Piel

Application of Work Standardization to Evaluate Productivity and Quality in a Leather Belt Manufacturing Process

Mares-Castro, A.^{1*} , Gómez-Armenta, J.R.¹ , Arellano-Márquez, Y.Y.¹ 
(*armando.mc@purisima.tecnm.mx)

Recibido: 07-08-2024 Aceptado: 29-01-2025

RESUMEN

Este proyecto se llevó a cabo en la empresa X fabricante de cintos de piel, ubicada en León, Guanajuato, la cual cuenta con la certificación ISO 9001:2015 pero no dispone de forma inicial de métricas para la evaluación de calidad y productividad. A pesar de los esfuerzos iniciales por mantener altos estándares de calidad, la falta de comunicación y trabajo en equipo generó problemas como el incremento de retrabajos y la disminución de la calidad, adicionalmente, no se tienen de indicadores de desempeño adecuados. El objetivo del proyecto fue proponer una metodología basada en técnicas de Lean Manufacturing de estandarización del trabajo y 5s para solucionar estos problemas. Se comenzó con un análisis exhaustivo de la situación actual de la empresa para comprender el proceso productivo. La metodología aplicada incluyó la selección de herramientas Lean Manufacturing para el trabajo estándar y la identificación de defectos de calidad. Se diseñaron estándares del trabajo en las áreas de mayor impacto para mantener la productividad controlada y reducir los defectos. Los resultados indicaron

que la implementación de la metodología permitió la definición de indicadores de base para la gestión de la productividad y la calidad en la producción de cintos. Se logró establecer una línea de base para los controles y estándares para la estandarización y el control de procesos. La auditoría de calidad indicó un incremento del 56 al 68 %, y los indicadores de base para el proceso se estimaron en un 95 % en cuanto a cumplimiento, el porcentaje de rechazos por área al 0.15 % y el porcentaje de rechazos por clientes al 1.50 %. La propuesta fue presentada a la administración para asegurar la continuidad de las acciones y garantizar el seguimiento para una mejora continua. La contribución principal de este estudio se basa en una propuesta para la definición de estándares e indicadores base para procesos de manufactura que inician en ciclos de mejora continua.

Palabras clave: Estandarización del trabajo, Mejora continua, Reducción de MUDAS, Cinto de piel, Lean manufacturing.

¹División de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México campus ITS de Purísima del Rincón, Blvd. del Valle #2301, Guardarrayas, Purísima del Rincón, Guanajuato, México, C.P. 36413.



ABSTRACT

This project was carried out in company X, a leather belt manufacturer located in León, Guanajuato, which has ISO 9001:2015 certification but does not have metrics for evaluating quality and productivity. Despite initial efforts to maintain high quality standards, the lack of communication and teamwork generated problems such as increased rework and decreased quality. Additionally, there are no adequate performance indicators. The objective of the project was to propose a methodology based on Lean Manufacturing techniques for standardizing work and 5S to solve these problems. It began with an exhaustive analysis of the current situation of the company to understand the production process. The methodology applied included the selection of Lean Manufacturing tools for standard work and the identification of quality defects. Work standards were designed in the areas of greatest impact to keep productivity under control and reduce defects. The results indicated that the implementation

of the methodology allowed the definition of base indicators for managing productivity and quality in the production of belts. A baseline for controls and standards for process standardization and control was established. The quality audit indicated an increase from 56 % to 68 %, and the baseline indicators for the process were estimated at 95 % in terms of compliance, the percentage of rejections by area at 0.15 %, and the percentage of rejections by customers at 1.50 %. The proposal was presented to management to ensure the continuity of actions and guarantee follow-up for continuous improvement. The main contribution of this study is based on a proposal for the definition of standards and baseline indicators for manufacturing processes that begin in continuous improvement cycles.

Keywords: Work standardization, Continuous improvement, MUDA reduction, Leather belt, Lean manufacturing.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se desarrolló en la empresa X, Planta de Cintos de piel durante el año 2023. La empresa cuenta con la certificación ISO 9001:2015, pero a lo largo del tiempo ha enfrentado problemas debido a la falta de implementación consistente de sus procedimientos de calidad. Estos problemas incluyen un aumento de retrabajos, disminución de la calidad, trabajo sin tiempos establecidos e indicadores de calidad inexistentes. Ante esta situación, el objetivo de este proyecto es implementar técnicas de la metodología Lean Manufacturing (LM), específicamente las herramientas de estandarización del trabajo que incluyen: Toma de tiempos, balanceo de líneas, hoja de trabajo estándar, Takt Time, Capacidad del Proceso, Instrucciones de Trabajo y Hoja combinada estándar [1].

LM se basa en la eliminación de desperdicios o MUDAS (término japonés que refiere a todas aquellas actividades que no generan valor al proceso y al producto, como: sobreproducción, esperas, transporte, procesos inapropiados o sobre procesos, exceso de inventario, movimientos innecesarios, defectos). y la mejora continua de los procesos a través de herramientas específicas y la promoción de una cultura organizacional de excelencia [2]. Se utilizaron estas herramientas LM para abordar las MUDAS y defectos de calidad identificados. Finalmente, se diseñaron y estandarizaron procesos en las áreas de mayor impacto para mantener la calidad y reducir los defectos.

Este artículo presenta una metodología basada en LM mediante la estandarización del trabajo, las 5s.

En el contexto de mejora de procesos, las herramientas LM son metodologías enfocadas en la elimi-

nación de MUDAS y la mejora de la eficiencia en la producción. Estas herramientas son especialmente recomendables en empresas que buscan reducir costos, mejorar la calidad, y aumentar la satisfacción del cliente al optimizar el flujo de trabajo. Entre las más comunes y aplicadas se encuentran la estandarización del trabajo y las 5s, que ayudan a estandarizar actividades y mejorar la organización, reduciendo errores y tiempos improductivos. Si bien existen otras herramientas Lean como Kaizen o Kanban, estas no se emplearon en esta fase inicial porque el enfoque primario era establecer una base sólida de control en el proceso. Una vez lograda esta base, herramientas adicionales podrían aplicarse para avanzar en el ciclo de mejora continua y optimización del flujo de producción.

En las siguientes secciones se presenta la metodología propuesta para el análisis del proceso de fabricación de cintos de piel con el uso de las herramientas de estandarización del trabajo, el establecimiento de indicadores de calidad y la matriz de riesgos. En los resultados se presentan los formatos obtenidos y el resumen de indicadores del proceso y de la calidad, finalmente, se presentan una discusión y las conclusiones obtenidas.

ESTADO DEL ARTE

Un aspecto clave de esta implementación fue la estrecha relación entre el estudio de métodos y la estandarización del trabajo (ET). El estudio de métodos permite identificar las mejores prácticas y los pasos más eficientes en cada operación, eliminando actividades innecesarias y optimizando el flujo de trabajo [3]. Estos procedimientos mejorados se documentan y se convierten en estándares de trabajo, asegurando que todos los empleados sigan procedimientos uniformes y eficientes. La ET no solo mantiene la consistencia en el nivel de la producción y la reducción de la variación, sino que también facilita el entrenamiento de nuevos empleados y la evaluación del desempeño, reduciendo la variabilidad y mejorando la calidad y productividad [4].

Pereira et al [5] señalan que las hojas de Trabajo Estándar (HTE) y las Instrucciones de Control y Fabricación (ICF) son herramientas esenciales en la ingeniería de procesos. Las HTE e ICF son guías detalladas que describen cómo realizar una tarea específica de manera eficiente y efectiva, proporcionan instrucciones paso a paso, incluyendo medidas, configuraciones de equipos y tiempos estimados para cada paso, ayudan a reducir la variabilidad y garantizan la calidad constante al eliminar ambigüedades y desviaciones en la ejecución de tareas, son especialmente útiles en entornos de fabricación, donde la precisión es crucial [6].

La implementación del enfoque Lean y su sostenibilidad están fuertemente vinculadas con la cultura organizacional, y, en consecuencia, la cultura define el éxito. La cultura organizacional está estrechamente relacionada con la dinámica de la organización. Con la participación de la gerencia se pueden lograr mejoras en la productividad impactando así en la percepción y aceptación de estas herramientas por parte de los operadores, reduciendo la resistencia al cambio [7].

Mor et al [8] publicaron los hallazgos de un caso de estudio de ET con la formulación del problema para obtener ganancias de productividad mediante los procedimientos de Trabajo en una empresa de fabricación de núcleos de acero. Mediante la aplicación del ET se creó transparencia en el flujo de trabajo, mejoró la seguridad y eliminó los 3Ms (Movimientos innecesarios, Movimientos ineficientes y Movimientos peligrosos).

Con relación a la manufactura de cintos de piel, Tette & Navarro [9] introducen los conceptos de

organizativa robusta, mediante la implementación de procesos de producción eficientes, y el desarrollo de un plan financiero sólido para la producción de cinturones de cuero. Un caso similar se presentó en Tabasco, un estado del sureste de México que cuenta con diversas artesanías, entre las cuales destaca la “tira bordada”, que representa una parte esencial de su cultura, identidad y sentido de pertenencia [10].

Tapia et al [11] propusieron una aplicación del control estadístico de procesos en una empresa ubicada en Guanajuato, utilizando estadística descriptiva, cartas de control y análisis de capacidad en uno de los procesos críticos en la fabricación de cinturones de piel. Mendez [12] utilizó la técnica MOST (Técnica de Operaciones Secuenciales de Maynard) para tiempos predeterminados en una maquiladora de cinturones de piel, con el fin de determinar el tiempo estándar de dicha actividad y obtener el valor óptimo del desempeño de un operario durante una jornada laboral.

Gómez et al [13] presentaron un caso de estudio basado en el análisis y simulación del proceso de elaboración de cintos de piel utilizando el software PROMODEL, con el fin de mejorar los tiempos y redistribuir las áreas mediante la metodología de planeación sistemática de la distribución en planta (SLP). El estudio se llevó a cabo en una empresa dedicada a la elaboración de artículos de piel, ubicada en el norte del estado de Veracruz, México, logrando un aumento del 44 % en la producción.

Esta propuesta se alinea con la literatura existente y la enriquece al proporcionar un caso específico y detallado dentro de la estandarización del trabajo en la manufactura de cintos de piel, contribuyendo a una mejor comprensión de como estas metodologías pueden ser implementadas y sostenidas en diferentes contextos industriales, en la mejora de la calidad, productividad y seguridad en los procesos de fabricación.

METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se diseñó para abordar de manera integral los problemas de producción y calidad identificados en la planta de cintos de la empresa X. Siguiendo los principios de LM, se implementaron técnicas de estandarización del trabajo, las 5s y análisis y el número de prioridad de riesgo (RPN por sus siglas en inglés) con el objetivo de optimizar los procesos, reducir MUDAS y establecer una cultura de mejora continua. El procedimiento general se dividió en varias fases clave, cada una con pasos específicos para asegurar una implementación efectiva y sostenible, como se muestra en la Figura 1.

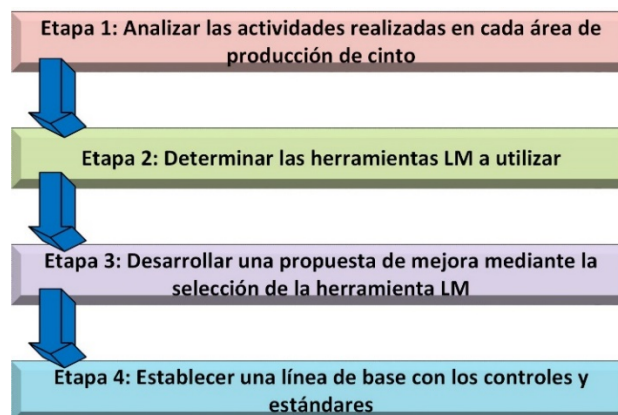


Figura 1: Metodología Propuesta. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se explican cada una de las actividades ligadas a las cuatro etapas de la metodología general:

Observación e identificación de las áreas de trabajo (Etapa 1)

En esta actividad se recolectó información sobre el proceso productivo de la empresa, incluyendo el área de inspección, con el objetivo de comprender cómo trabaja el personal y retroalimentar la información obtenida de las entrevistas. Se analizó el sistema productivo de cintos, desde la entrega de material hasta la inspección de calidad, para conocer cada una de las áreas de trabajo. Se elaboró el diseño de distribución (layout) de la empresa para visualizar la ubicación de las áreas y obtener un análisis más detallado de las mejoras a implementar. Para ello, fue necesario realizar mediciones precisas de la planta, así como de las mesas y máquinas en cada área. En este paso, se procedió a observar las áreas de producción, incluyendo la inspección de calidad. Para lograr esto, fue necesario utilizar el croquis existente en la empresa y elaborar el layout, midiendo las mesas y máquinas necesarias para el procedimiento.

Toma de tiempos de las actividades (Etapa 1)

En este paso, se procedió a determinar el tiempo invertido en cada uno de los procesos de producción de cintos. Se utilizó el método de estudio de tiempos con cronómetro para lo cual se utilizó un formato especializado para la toma de tiempos. El cálculo del tiempo estándar se realizó mediante el método *Maytag*.

Realización de diagrama de proceso (Etapa 1)

Después de obtener los tiempos estándar de cada una de las actividades, se procedió a realizar el diagrama de operaciones del proceso productivo de cintos. Esto será de gran ayuda para visualizar cada una de las áreas de manera general, ya que dentro de la empresa no se cuenta con un formato específico que detalle cada actividad y sus tiempos. Para realizar esto, fue necesario recolectar información mediante la observación y entrevistas al personal, ya que cada operador conoce exactamente lo que realiza en su área.

Determinar puntos críticos (Etapa 2)

Se realizó un análisis de causa-raíz para determinar las posibles causas de las MUDAS en el proceso. Con la información proporcionada por los datos históricos de las causas de rechazo, se procedió a evaluar el RPN, el cual ayuda a estimar la prioridad de los problemas a tratar. Este se calcula multiplicando la gravedad, la ocurrencia y la detección, de acuerdo con el Manual del Análisis de modo y efecto de fallos (AMEF) del Grupo de acción de la industria automotriz (AIAG). La implementación del AMEF y el cálculo del RPN en el sector manufacturero permiten identificar, evaluar y priorizar riesgos en materiales, diseño y ensamblaje, mejorando así la durabilidad y seguridad del producto.

Realizar listado de MUDAS (Etapa 2)

Después de la observación de tiempos y la reunión con el personal administrativo, se procedió a elaborar un listado de las MUDAS detectadas en el proceso productivo. Para observar y analizar de manera más detallada las MUDAS, se utilizó un formato especial. Para llenar este formato, se necesitó información de los puntos críticos obtenidos de la matriz de RPN, de acuerdo con los resultados de cada

área. En el formato se incluyó el área, una descripción de esta, las posibles causas que determinan las MUDAS y sus siete tipos.

Diseñar propuesta de mejora (Etapa 3)

Una vez definidas las herramientas de LM a aplicar, se elaboró la propuesta de mejora. Se implementaron cada una de las herramientas definidas, aplicando las metodologías de manera individual, esto se realizó de acuerdo con el nivel de afectación.

Diseñar indicadores en el proceso (Etapa 4)

Después de haber implementado la alternativa de mejora, se procedió a establecer estándares, con la finalidad de controlar el funcionamiento y ejecución de las propuestas. Para el diseño de los estándares se utilizaron los datos de las etapas anteriores, el tiempo estándar y las ayudas visuales, además, se establecieron los Indicadores Claves de Rendimiento (KPI), su meta y los responsables de medirlos.

Dentro del Sistema de Gestión de Calidad, se elaboraron formatos sobre las alertas de calidad en cada una de las áreas, con el objetivo de ayudar a los operadores a identificar los posibles defectos en el producto. Para determinar los puntos críticos, fue necesario analizar los defectos de calidad según las inspecciones realizadas. Se analizaron los meses de junio, julio, agosto y septiembre para obtener más datos. Las inspecciones se realizan de acuerdo con los pedidos.

Alertas de calidad

Dentro del Sistema de Gestión de Calidad, se elaboraron formatos sobre las alertas de calidad en cada una de las áreas, con el objetivo de ayudar a los operadores a identificar los posibles defectos en el producto. Algunos de estos formatos aún están en buenas condiciones; sin embargo, otros necesitan ser actualizados debido a las variaciones en las condiciones de cada piel con la que se trabaja.

RESULTADOS

Indicadores de calidad en el cinto

Se diseñó un formato de indicadores de calidad que se encuentra en la nube. Los datos se capturan de acuerdo con los registros de las inspecciones diarias, esto se hace solo con el total de los defectos encontrados en todos los modelos, como se muestra en la Figura 2, la cual solo especifica datos del mes de junio. En el área de adorno se ha observado que algunas pieles exóticas son más difíciles de resanar debido a que la selección de productos no era la adecuada para cubrir los defectos.

Layout del área de trabajo

El proceso productivo de la empresa está compuesto por el área 1 y el área 2. Dentro del área 1 se encuentran los procesos de exótico, corte, embarrado, refilado, rodillo, punta, rayado, perforado 1, desorillado, rebajado de piel, despirme, remachado, empalme y perforado 2. En el área 2 se encuentran pulido, pintado de filos, banco de pulido de limpieza, chaqueta, pintado de perforación y muesca, limpieza de vista, limpieza de forro, pespunte, deshebrado, foliado, troquelado, adorno-vista, adorno forro y armado final. En la Figura 3 se puede observar el cambio realizado en el área de calidad, donde se encuentran todos los inspectores necesarios para asegurar que el producto cumpla con las características del cliente.

Toma de tiempos

Con la finalidad de identificar las MUDAS y los puntos críticos, se elaboró la toma de tiempos de

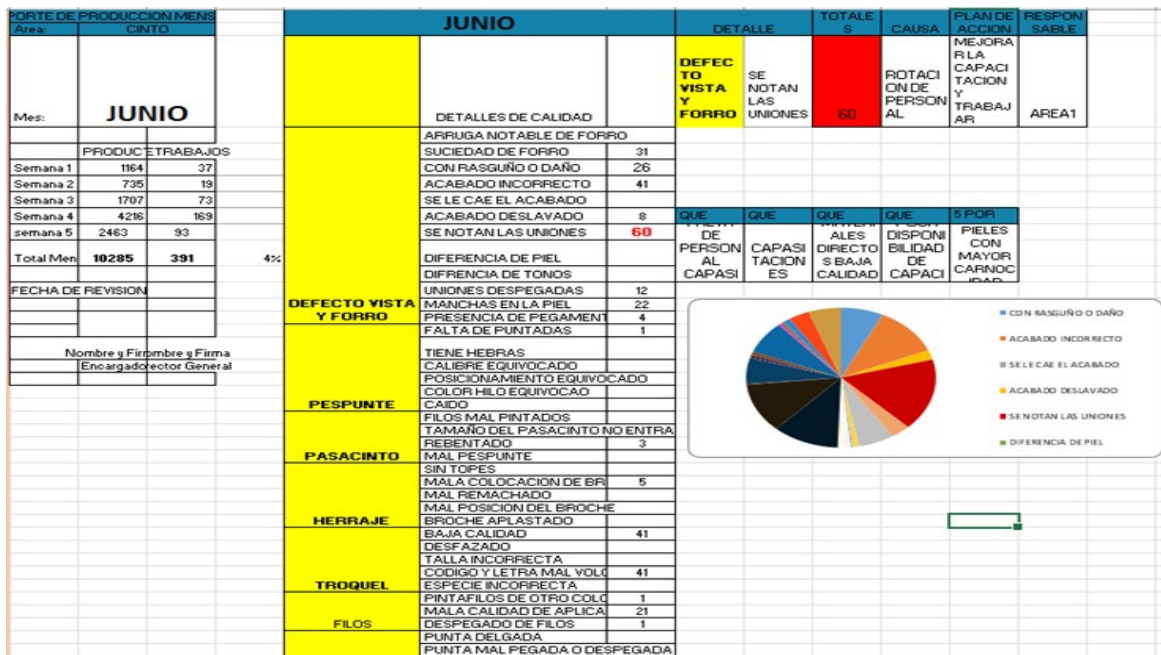


Figura 2: Indicadores de calidad en el cinto del mes de junio. Fuente: Elaboración Propia.

cada una de las áreas. Durante 3 semanas, se tomaron tiempos a las personas de producción, a la par de la observación de sus actividades.

Mediante los tiempos cronometrados, se determinó el tiempo estándar de cada una de las áreas, tomando en cuenta el modelo de cinturón de Tecovas Res, debido a que cada producto tiene un proceso diferente. En la Figura 4 se muestra uno de los formatos de captura de tiempos generado para el estilo “Tecovas”.

Diagrama de flujo del proceso

Para conocer el proceso productivo del cinto de res, fue necesario elaborar un diagrama de flujo que abarcara todas las actividades de producción, ya que cada área involucra numerosas tareas. Este diagrama se muestra en la Figura 5, cabe señalar que se muestra solamente una sección del proceso, ya que se tienen 107 actividades totales. En el diagrama se indica si la etapa es una actividad, inspección, transporte, demora o almacenamiento.

Se registraron los tiempos de transporte por cada área y se presentó al encargado que, por cada lote de 10 cintos, se invierten 376 segundos en transporte, multiplicado por 800 cintos producidos semanalmente, esto equivale a 8.3 horas semanales, es decir, casi 1 hora y media de transporte por jornada laboral. Por tal motivo, se decidió contratar a una persona que se encargue de los transportes, así como de los materiales y herramientas, para evitar que el personal tenga que trasladarse cuando necesite algo.

Matriz de prioridad de riesgo

La matriz de prioridad de riesgo se utilizó para comprobar si los defectos de calidad afectan significativamente el producto final, tomando como parámetros de evaluación la severidad, ocurrencia y detección, según los estándares de las Tablas para el AMEF del grupo de acción de la industria automotriz AIAG, con la finalidad de obtener el resultado final, el cálculo para determinar el RPN. Este análisis se basó en

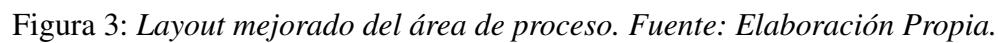


Figura 4: *Formato de captura de tiempos: Fuente: Elaboración Propia.*

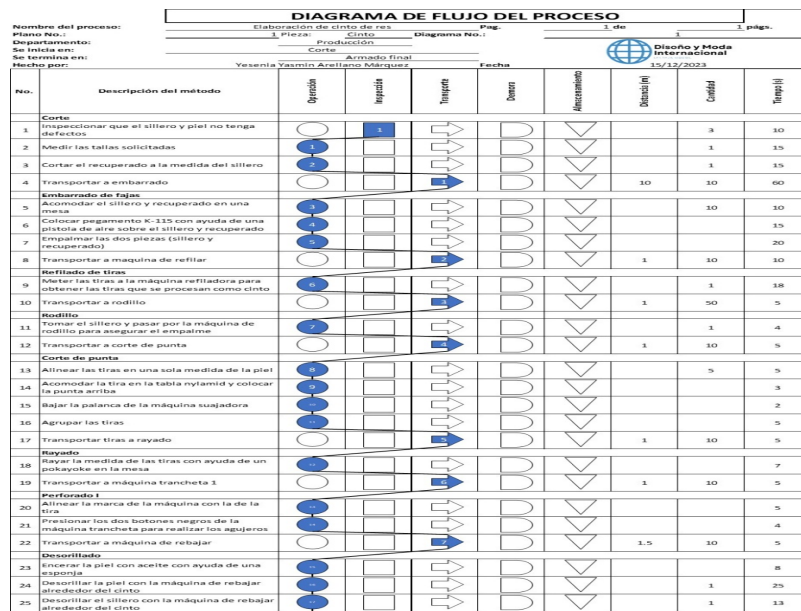


Figura 5: Diagrama de flujo del proceso. Fuente: Elaboración Propia.

los diagramas de Pareto para los cuatro meses seleccionados (junio, julio, agosto y septiembre).

En la Tabla 1 se observa que los defectos con mayor severidad son: suciedad de forro, uniones visibles, mala calidad en la aplicación de pinta filos, desprendimiento del acabado, tramas, uniones despegadas y broches de mala calidad. Al compararlos con los diagramas de Pareto de los defectos de cada mes (junio, julio, agosto y septiembre), se nota que estos defectos ocurren con mayor frecuencia, es decir, tienen porcentajes más altos en el total de la producción. La intervención en estos puntos críticos, de acuerdo con los defectos de calidad, mediante inspecciones y la aplicación de herramientas de LM, ayudará a hacer más eficiente el uso de recursos y a gestionar la mejora continua en el proceso productivo.

Auditorías 5s

Los resultados de la implementación y auditorías de las 5S en la planta de cintos de la empresa X fueron significativos. Inicialmente, la evaluación del estado de las 5S arrojó un nivel de cumplimiento del 56 %, lo que evidenció diversas áreas de oportunidad en la organización y limpieza del espacio de trabajo. Tras la aplicación rigurosa de las 5S —clasificación, orden, limpieza, estandarización y disciplina— se realizaron auditorías periódicas para monitorear el progreso y asegurar la adherencia a las nuevas prácticas. Como resultado de estas acciones, el nivel de cumplimiento mejoró notablemente, alcanzando un 68 %. En la Figura 6 se muestra un comparativo del antes y después de la aplicación de 5s.

Las acciones 5s incluyeron: Seiso (limpiar), donde se limpió la estantería, se cambió el papel aluminio y se instaló un plástico protector para facilitar la limpieza de pigmentos. En Seiketsu (estandarizar), se usaron ayudas visuales del SGC y se colocaron referencias para identificar especificaciones correctas de la producción. Para Shitsuke (seguimiento), se creó una evaluación gráfica para mostrar mejoras y se etiquetaron pigmentos, además de agregar tapaderas a envases para prolongar su vida útil. Finalmente, en Seiri (seleccionar), se identificaron y eliminaron objetos no útiles en el área de pintura, mejorando la organización de la estantería.

Tabla 1: Matriz RPN para los defectos. Fuente: Elaboración propia.

Defecto	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Suciedad de forro	9	6	2	108
Acabado incorrecto	7	5	5	175
Se notan las uniones de piel (exótico)	9	8	2	144
Diferencia de tonos piel	7	5	3	105
Mala calidad de aplicación de pinta filos	9	9	2	162
Se le cae el acabado	8	5	4	160
Tramas	8	6	4	192
Uniones despegadas	9	7	2	126
Manchas en la piel	6	5	5	150
Broche de mala Calidad	9	6	2	108
Falta de puntadas	7	5	2	70
Suciedad de forro	9	6	2	108
Acabado incorrecto	7	5	5	175
Se notan las uniones de piel (exótico)	9	8	2	144
Diferencia de tonos piel	7	5	3	105

Capacidad de operación

Para determinar la capacidad de operación, fue necesario obtener la capacidad de manufactura de cada uno de los procesos, como se muestra en la Figura 7. La capacidad de manufactura para cada operación es la siguiente: el proceso de entallado tiene una capacidad de 924 unidades en un turno de 10 horas, descontando el tiempo de descanso; el proceso de rebajado tiene una capacidad de 430 unidades; y el proceso de pegado, 215 unidades. A partir de estos resultados, se observó que el operador en el proceso de entallado a veces se queda sin trabajo, en comparación con los demás operadores que aún tienen tareas pendientes.

Balanceo de líneas

En el área de exótico se requieren tres operadores, uno para cada operación: entallado, rebajado y pegado. Como se observó en el paso anterior, la operación de pegado tiene una menor capacidad de manufactura. Esto se debe a que es una operación más complicada, ya que se debe asegurar que las uniones queden en perfectas condiciones de pegado. En la Figura 8 se muestra el análisis del balanceo de líneas, en la cual se puede observar en color rojo el Takt Time y en color azul el tiempo de las actividades, el proceso debe balancearse con la finalidad de asegurar que todas las actividades queden debajo del Takt Time, ya que de no realizarse esto, no se podrá lograr cubrir la demanda del cliente en el tiempo establecido.

Para el cálculo del Takt Time se tiene un tiempo disponible total por turno de 33600 segundos y una demanda diaria de 500 cintos, con lo cual se obtiene un Takt Time de 67 segundos. La capacidad = Tiempo disponible (segundos) / Tiempo más largo (segundos), con lo cual se tiene $33600 / 156 = 215$ cintos / día. Como se puede observar, la operación de pegado excede el Takt Time, por lo que es necesario agregar un cuarto operador para nivelar las cargas y poder satisfacer la demanda.

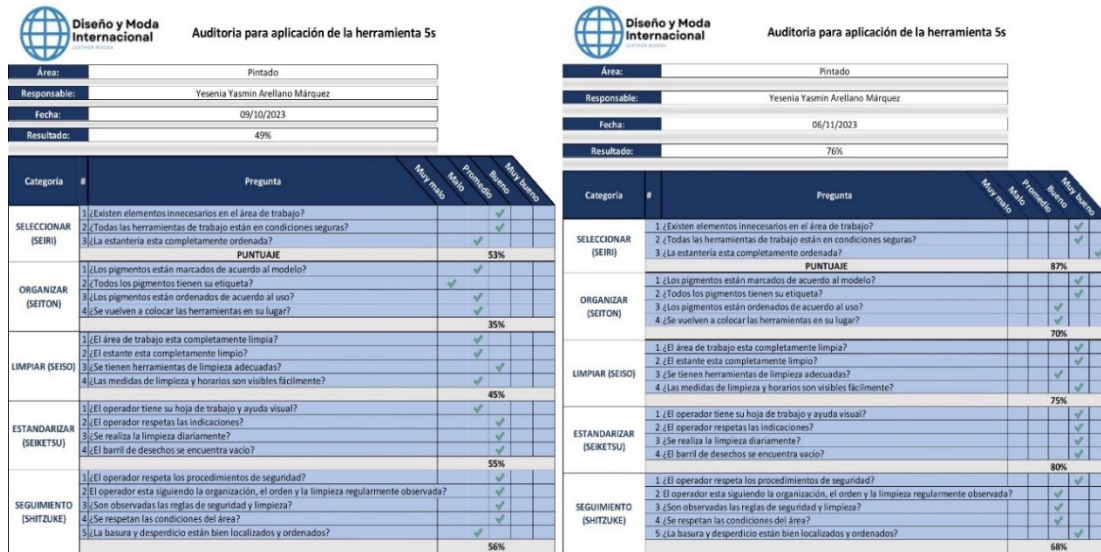


Figura 6: Comparativo de Auditorías de 5s antes y después. Fuente: Elaboración Propia.

Área	1	CAPACIDAD DE OPERACIÓN						Parte No.	1	Tipo prod.	Lineal	Sección	Exótico
Encargado	Luis							Nombre	Cinto de exótico	Partes/Producto	1	Tiempo disponible	33600
Secuencia	Nombre de proceso	Máquina No.	Tiempo estándar						Cambios de herramienta	Capacidad de Manufactura		Observaciones	
			Manual	Automático	Total				Incremento de cambios	Tiempo de cambio			
			Min.	Seg.	Min.	Seg.	Min.	Seg.					
1	Entallado		0.00	36.36	0.00	0.00	0.00	36.36	0	0	924		El operador sale de su área continuamente por falta de herramienta
2	Rebajado		0.00	78.18	0.00	0.00	0.00	78.18	0	0	430		La postura que mantiene el operador es incorrecta por lo cual hace que tenga un ritmo de trabajo bajo
3	Pegado		0.00	####	0.00	0.00	0.00	156.45	0	0	215		El operador es hábil en la operación que realizar

Figura 7: Capacidad de operación para el proceso de exótico. Fuente:Elaboración Propia.

Análisis de balance

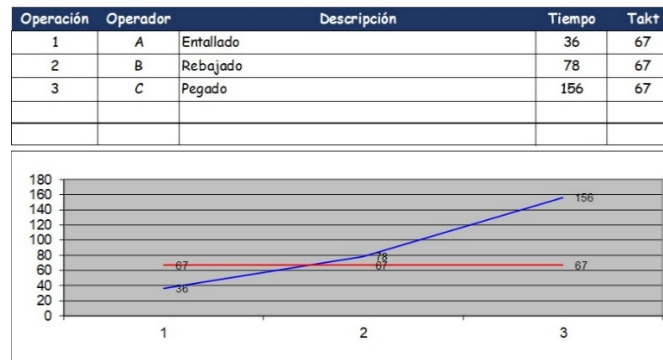


Figura 8: Balanceo de líneas área de exótico. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla combinada de operaciones estandarizadas

Dentro del trabajo estándar, la tabla combinada de operaciones es una importante herramienta gráfica que nos permite ubicar elementos de MUDAS que pueden eliminarse en el proceso y visualizarlo en una escala temporal, de esta forma es más sencillo ubicar áreas de oportunidad para la aplicación de técnicas Lean para mejorar el proceso. En la Figura 9 se muestra la Tabla combinada de operaciones para el área de exótico, en la cual se observa que el tiempo de ciclo excede notoriamente el Takt Time, por lo que es necesario incrementar la capacidad de acuerdo con lo observado en el balanceo.

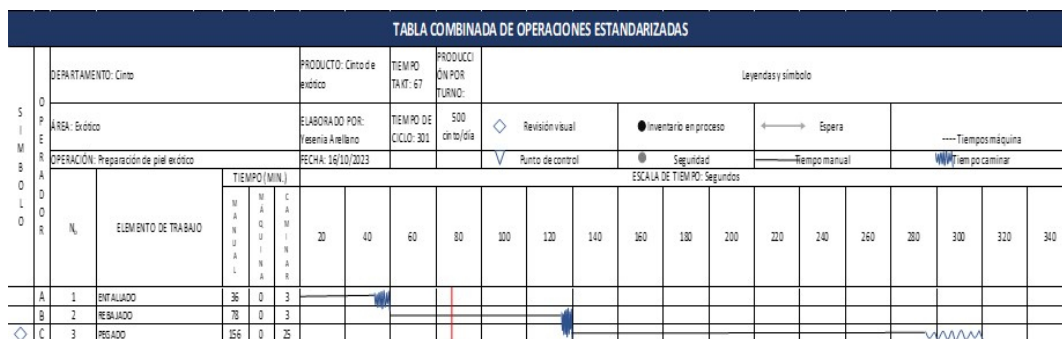


Figura 9: Tabla combinada de operaciones estandarizadas. Fuente: Elaboración Propia.

Hoja de trabajo estandarizado corregida

En el área de exótico se cuenta con tres operadores, cada uno especializado en una operación específica: entallado, rebajado y pegado. Todas las tareas se realizan manualmente, sin intervención de máquinas. Para visualizar el flujo de producción, se elaboró una hoja de trabajo estándar (Figura 10). Se puede observar el flujo de producción del área de exótico. En la sección de almacén, se encuentran tanto las pieles del cliente (materia prima) como las pieles ya procesadas (proceso de exótico). El encargado del área 1 lleva un registro de las entradas y salidas correspondientes a esta área. Por esta razón, el último proceso tarda 25 segundos en trasladar el material.

TRABAJO ESTANDAR						
 Diseño y Moda Internacional			NOMBRE DE LA OPERACIÓN: Preparación de exótico		DESDE: Entallado	FECHA: 23 de octubre 2023
					HASTA: Pegado	FIRMA:
No	ELEMENTO DE TRABAJO	TIEMPO (MIN)				
		MANUAL	ESPERA	CAMINAR		
1	Entallado	36	0	3		
2	Rebajo	78	0	3		
3	Pegado	156	0	25		
TOTAL		270	0	31		

ALMACÉN

```

graph LR
    1((1)) --> 2((2))
    2 --> 3((3))
    3 --> ALMACEN[ALMACÉN]
    ALMACEN --> 1
            
```

TRABAJO MIENTRAS EL PRODUCTO SE MUEVE

CAMINAR

REGRESO AL INICIO

COMENTARIOS

ELABORADO DE CONTROL	REVISIÓN VISUAL	SEGURIDAD	INVENTARIO DEL PROCESO	TIEMPO CICLO	TIEMPO TAKT	ANÁLISIS NO.
				301	67	1

Figura 10: Hoja de trabajo estándar. Fuente: Elaboración Propia.

Hoja de instrucción de trabajo

Al examinar el formato actual de la empresa, se identificó que es deficiente, ya que carece de información crucial para la realización de las operaciones. Por ello, se propuso una hoja de instrucción de trabajo (Figura 11).

Se puede observar el proceso de entallado, el cual comienza desde la recepción de la materia prima, en este caso, la piel de exótico. En este proceso, es necesario que el operador tenga conocimientos de la programación semanal, ya que esto le ayuda a realizar las tallas de acuerdo con el pedido del cliente. Además, se agregó el tiempo de cada actividad. Este formato es muy práctico, ya que sirve como ayuda visual y explica de forma detallada los procedimientos de las operaciones, así como información adicional, como el equipo de protección y las revisiones de calidad.

Indicadores de calidad propuestos

Como parte final, se diseñaron estándares para controlar las actividades, basados en los reportes de inspecciones. Estos estándares son una propuesta para reflejar una mejora en la calidad, ya que la implementación se estará monitoreando, Los KPI propuestos se muestran en la Tabla 2.

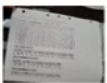
No. Área	1	 Diseño y Moda Internacional DESIGN AND MODA	Característica especial	Habilidad requerida	Fecha emisión	30/10/2023	Elabora	Revisa	Aprobea
No. Proceso	1		Exótico	Entallar	Fecha revisión		Yesenia Arellano		
Proceso	Entallado				No. control	DYMI-HIT-001			
Responsable	Carlos	Símbolos	Equipo de protección personal	     	Revisión de calidad				
No.	Operación	Procedimiento	Tiempo (segundos)	Símbolos	Puntos clave	Necesidad de conocimiento	Ayudas visuales		
1	Recepción	Se recibe desde el almacén la piel y una programación.				Programación semanal	 		
2	Inspección de calidad	Después de que se entrega la programación y la piel, esta se inspecciona que coincida en los tonos, que no existan garrapatas, coincida el acabado y tenga un peso límite de 39 mm. Si se detecta alguno de estos defectos se deberá regresar a almacén.	15			Defectos de calidad	 Revisión de paso 39 		
3	Corte y marca de talla	Si la piel está en buenas condiciones, se realiza el corte y se marca la talla que le corresponde.	36			Defectos de calidad Programación semanal			
4	Acomodo final	Cuando ya está marcada la talla y cortada la piel, se acomoda en un cajón para pasar a la siguiente operación.	8						

Figura 11: Hoja de instrucción de trabajo. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2: Indicadores de calidad propuestos. Fuente: Elaboración Propia.

Estándares	Fórmula	Meta
Porcentaje de cumplimiento de capacitaciones	$\frac{\text{No. de capacitaciones a op}}{\text{Número teórico de capacitación}} \times 100$	95.00 %
Porcentaje de rechazos por área	$\frac{\text{Cant. cintos rech. por área}}{\text{Cant. de cintos rech. gral}} \times 100$	0.15 %
Porcentaje de rechazos por clientes	$\frac{\text{Cant. de cintos rech. por cliente}}{\text{Cant. de cintos rech. gral}} \times 100$	1.50 %

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La implementación de la metodología LM, especialmente las 5S, en la planta de cintos de la empresa X ha generado mejoras significativas en la calidad y eficiencia del proceso productivo. La auditoría inicial de las 5s mostró un cumplimiento del 56 %, que aumentó al 68 % tras la implementación. Este avance refleja una organización y limpieza más efectivas.

La estandarización del trabajo fue crucial en esta mejora, permitiendo definir claramente los procedimientos operativos, los tiempos de ciclo y los puntos de control de calidad. Mediante el estudio de métodos, se identificaron y eliminaron actividades innecesarias, optimizando el flujo de trabajo y estableciendo tiempos Takt que alinearon la producción con la demanda del cliente.

Este estudio contribuye al conocimiento en la implementación de LM en pequeñas y medianas empresas del sector manufacturero, específicamente aquellas que, pese a cumplir con estándares de calidad como ISO 9001:2015, carecen de indicadores clave de desempeño que soporten la productividad y calidad. Dirigido a ingenieros industriales, gerentes de calidad y producción, y consultores en mejora continua, este artículo brinda una base estructurada para iniciar ciclos de mejora continua en empresas manufactureras.

En resumen, la implementación de LM y las 5S en la planta de cintos de la empresa X ha resultado en una mejora sustancial de la calidad y eficiencia del proceso productivo. La estandarización del trabajo, la determinación del tiempo Takt y la capacidad del proceso, junto con la identificación de MUDAS, han sentado las bases para una cultura de mejora continua.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Armando Mares Castro: Investigación, Supervisión, Administración del proyecto, Conceptualización, Escritura – revisión y edición. **José Ramón Gómez Armenta:** Supervisión, Validación, Metodología. **Yesenia Yasmin Arellano Márquez:** Validación, Metodología, Investigación, Escritura – borrador original.

REFERENCIAS

- [1] L. Socconini. *Manual de Certificación Lean Six Sigma Green Belt para la excelencia en los negocios*. Sakefat, SL (Madrid), 2021.
- [2] L. Socconini and E. Escobedo. *Lean Six Sigma Green Belt Paso a paso*. Marge Books, Sakefat, SL (Madrid), 2021.
- [3] B. Niebel and A. Freivalds. *Ingeniería industrial: métodos, tiempos y movimientos*. Edición 14, McGraw Hill, 2014.
- [4] M. L. Emiliani. Standardized work for executive leadership. *Leadership and Organization Development Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 24–46, 2008. doi: <https://doi.org/10.1108/01437730810845289>.

-
- [5] A. Pereira et al. Reconfigurable Standardized Work in a Lean Company - A Case Study. *Procedia CIRP*, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.019>.
- [6] T. Whitmore. Standardized work. *Technologies SME*, vol. 140, mayo 2008.
- [7] A. Hussain, A. U. Rehman, K. Case, T. Masood, and M. S. Habib. Lean Manufacturing Culture: The Role of Human Perceptions of Standardized Work. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, vol. 8, pp. 523–528, 2018. doi: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-902-7-523>.
- [8] R. S. Mor, A. Bhardwaj, S. Singh, and A. Sachdeva. Productivity gains through standardization-of-work in a manufacturing company. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 30, no. 6, pp. 899–919, oct. 2019. doi: <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2017-0151>.
- [9] A. A. Tette Deoro and S. R. Navarro Ferreira. Creación de una empresa manufacturera y exportadora de cinturones de cuero, en la ciudad de Santa Marta. UAN. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/9440>. [Acceso: 7-ago-2024].
- [10] C. García Muñoz Aparicio, B. Pérez Sánchez, and M. del C. Navarrete Torres. La ‘Tira Bordada’ como recurso territorial turístico del patrimonio cultural de Tabasco (México). *Revista Internacional de Turismo, Empresa y Territorio*, vol. 5(2), pp. 162–174, 2021. doi: <https://doi.org/10.21071/riturem.v5i2.13689>.
- [11] L. D. Tapia-Torres, J. M. Novelo-Acosta, Y. V. Alonso-Rangel, and M. Gutiérrez-del Real. Control estadístico de procesos aplicado en una empresa de marroquinería. *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, vol. 12(4), pp. 521–531, 2020.
- [12] J. C. Méndez Estrada. Aplicación del sistema MOST para la determinación de tiempos estándares en maquiladora Chambers de México SA de CV. UNISON. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12984/1519>. [Acceso: 7-ago-2024].
- [13] D. I. C. Gómez, L. C. Rivero, and M. L. M. Hernández. Simulación para la Optimización del Proceso de Fabricación de Artículos de Piel con el Software Promodel. *Innovación Productiva*, p. 12, 2021.

Importancia del acceso a la información del consumo de energía en hogares alemanes, mexicanos y rusos

Importance of Access to Information on Energy Consumption in German, Mexican, and Russian Households

Aguero-Shkurenkov, A.¹ , Weber, B.^{1*} 
(*bweber@uaemex.mx)

Recibido: 06-11-2024 Aceptado: 25-03-2025

RESUMEN

La energía es vital para el funcionamiento y bienestar del Estado, economía en general y los hogares, a su vez es importante tener información al respecto, la cual permitiría hacer pronósticos que facilite la toma de decisiones. En este estudio se analizará comparativamente el acceso y calidad de la información disponible sobre el consumo de energía en los hogares de México, Alemania y Rusia que son países con diferente situación de autosuficiencia energética. Lo anterior es para determinar diferencias en la administración de energía y cómo los hogares pueden ser afectados por dicha administra-

ción al momento de estar mal informados. Hay indicios de que el nivel de autosuficiencia energética hace correlación negativa con la información disponible sobre el uso de energía. Se encontró que, aunque en México existe información energética sobre los hogares es desactualizada y limitada, en Alemania existe información periódica y en Rusia está limitada la información lo que se ha puesto más grave últimamente por razones de seguridad.

Palabras clave: Balances de energía, Pronósticos de energía, Eficiencia energética.

ABSTRACT

Energy is vital for the functioning and welfare of the State, its economy in general and for households. In addition, it is important to have access to information about energy demands, which would allow forecasts to facilitate decision making. This study analyzes comparatively the access and quality of the available information about energy consumption in households in Mexico, Germany and

Russia, which are countries with different levels of energy independence. Further investigated is how such differences in energy management can affect households that may be misinformed. There are indications that the level of energy self-sufficiency correlates negatively with the information available on energy use. It was found that, Mexico has limited and outdated information about energy consum-

¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Universidad S/N, Toluca, Estado de México, México, CP 50130.



ption in households, while in Germany the information is more abundant and is periodically updated.

For Russia energy information access is also limited, which has become more serious lately due to

security reasons.

Keywords: Energy balances, Energy projections, Energy efficiency.

INTRODUCCIÓN

El acceso a la información sobre el consumo de energía es relevante a nivel nacional, empresarial y en los hogares, por ejemplo, conociendo las distintas necesidades energéticas de los hogares es posible determinar su grado de pobreza energética o vulnerabilidad energética. A nivel nacional, conocer los datos sobre el consumo permitiría una correcta gestión de energía que implica garantizar el suministro energético, analizar los costos relacionados con la adquisición de los energéticos, consideraciones ambientales y análisis de datos históricos para elaborar prospectivas. Otro factor importante en la gestión de energía es la política nacional e internacional ya que se crean diversas estrategias energéticas.

Las prospectivas a nivel nacional son importantes para implementar programas y estrategias para su desarrollo energético [1] y están sujetas a un margen de error que depende de la calidad de los datos obtenidos y cómo se analizan, además, las prospectivas pueden ya no ser validas en situaciones atípicas como lo ocurrido durante la pandemia de COVID-19 con la reducción de la demanda de energía a nivel mundial por un 4 % en 2020 [2]. Schneider en 1981 indicó que el pronóstico de consumo de energía no solo debe basarse en datos históricos, también requiere del conocimiento de cómo reacciona la sociedad a cambios en su entorno [3]. Además, una mejor gestión de energía debe considerar el análisis del error al comparar la generación de energía y el consumo real de energía. Por ejemplo, en la República Federal de Alemania (Alemania) se observó que la demanda de energía primaria en 1980 quedó muy debajo de lo que se estimó en 1973, incluso no fue influenciado por un crecimiento del producto interno bruto (PIB) del 20 % [4]. Una explicación se encuentra en las crisis de energía entre los años 1973-1974 y 1979-1980 debido a la introducción de tecnologías con una mayor eficiencia energética [5].

Hubbert en 1956 estimó correctamente la producción del petróleo crudo de los Estados Unidos de América (EUA) basándose en relaciones exponenciales para describir el incremento y el declive de la producción energética indicando la producción máxima en 1970 [6]. La acertada estimación de Hubbert no fue creída por parte de los tomadores de decisiones [7]. Con la implementación de tecnologías basadas en la fracturación hidráulica del subsuelo llamado “fracking” se ha podido levantar la producción nuevamente en los EUA superando ahora este pico histórico y convirtiéndose en un exportador de gas natural.

Respecto a la implementación de sistemas fotovoltaicos en esquemas de generación, ha siendo subestimada en varias ocasiones de acuerdo al análisis del grupo de investigación Carbon Brief [8]. Se ha planteado que este comportamiento es por la reducción de costos de los paneles, por cambios de estrategias políticas y por cuestiones ideológicos [9], lo anterior también se observa en prospectivas de otras agencias de desarrollo energético.

La construcción de parámetros energéticos permite interpretar las tendencias, realizar comparaciones y definir metas para determinar el plan adecuado sobre la gestión energética. Dependiendo del campo de aplicación se han desarrollado diferentes parámetros energéticos, por ejemplo, a nivel de un país está la Intensidad Energética, aunque es fuertemente criticado sigue siendo el más utilizado para relacionar

el crecimiento económico con la demanda de energía primaria [9]. Otros ejemplos, son la intensidad carbonosa y la participación de energías renovables en la matriz energética para poder evaluar tendencias de la transición energética.

Específicamente, la independencia energética, es definida por la Secretaría de Energía (SENER) de los Estados Unidos Mexicanos (México) en su Balance Nacional de Energía (BNE) de 2022 de la siguiente manera: “grado en que un país puede cubrir su consumo de energía derivado de su propia producción; si es mayor a uno, el país se considera autosuficiente energéticamente” [10]. Si un país es independiente energéticamente está más protegido frente situaciones difíciles en el contexto mundial, pero el parámetro no considera si se han tomado estrategias sostenibles.

Cabe señalar que en el BNE se encuentran algunos conceptos erróneamente traducidos o interpretados, por ejemplo, los conceptos de “residencial” y “energía limpia.”, por lo que se aclaran a continuación. Organizaciones como SENER y Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) clasifican el consumo de energía en México en los sectores de transporte, industrial y residencial. El último concepto mencionado (residencial) fue traducido de manera errónea de la palabra inglesa “residential”, ya que en español “residencial” sólo se refiere a un área urbana destinada a viviendas de cierta calidad (Diccionario en línea de la Real Academia Española) mientras que la palabra en inglés “residential” significa edificio donde las personas viven o un área o calle donde sólo hay casas privadas, no oficinas ni fábricas (Diccionario en línea del Cambridge).

Otro concepto a precisar es “energía limpia”, éste se menciona en trabajos de Michrowski en 1975 y 1990 el cual fue usado en reportes estadísticos como los que publica “World Energy Outlook” a principios de este siglo. Desde su definición original, la energía limpia es “natural supply, which do not leave residue, which are inexpensive, and which are universally applicable.” [19], el concepto ha evolucionado de tal forma que en 2001 Brown et al hacen una distinción entre tecnologías de eficiencia energética y energía renovable [20]. Actualmente los conceptos en el BNE los ha fusionado en el concepto de energía limpia y sin especificar a qué se refiere. Por la falta de una definición en el concepto de “energía limpia”, a la Secretaría de Energía se le permite embellecer sus datos, por ejemplo, lo observado recientemente en la prensa [21]. Los autores de este documento sugieren dejar de usar el concepto de energía limpia y hacer una separación entre eficiencia energía y energía renovable en el BNE.

La normatividad de un país guía las estrategias energéticas según el plan de desarrollo. Un ejemplo es la prohibición de la venta de focos incandescentes caracterizados por su baja eficiencia en varios países. Otro ejemplo se puede observar con la publicación de la ley “Gebäudeenergiegesetz” (Ley de Calefacción) [11] del gobierno alemán que se hizo vigente el 1 de enero de 2024 y que exige una participación de un mínimo de un 65 % de energías renovables en sistemas de calefacción para construcciones nuevas y se espera que pronto entre en vigor para cualquier construcción en estado de remodelación mayor. Por la necesidad de una alta inversión en tecnologías alternas como bombas de calor para la calefacción, se ha formado un grupo opositor manifestándose fuertemente en contra de esta decisión [12].

Otro aspecto importante en la gestión de energía, y de particular importancia para las normas ISO 50000 o EMAS, es el monitoreo de energía. Estos sistemas de recolección de datos sobre el consumo de energía permiten que se pueden detectar anomalías, que pudieran derivar en un mal funcionamiento de los equipos. Además, con los datos es posible encontrar mejoras en los procesos y la gestión de flujos de energía en los esquemas productivos. Un ejemplo es la implementación de medidores inteligentes para el consumo de la energía eléctrica del hogar, particularmente en Alemania existe una ley de implementación

de medidores inteligentes donde se busca alcanzar gradualmente cierto porcentaje de hogares dentro de la red de distribución [13].

Cada país tiene su forma de gestionar su energía y depende de los recursos disponibles en su territorio ya que pueden o no abastecer sus necesidades, esta condición es medida con el indicador de autosuficiencia energética. Alemania entró en el estado de no autosuficiente durante la transición de la era del carbón a la era de petróleo. Para 1973 se reportó una independencia energética de sólo 38 % [14], la cual en 1990 tuvo un valor muy cercano [15] por lo que se puede suponer que Alemania perdió su autosuficiencia energética décadas antes. Recientemente México entró en la misma situación mientras que la Federación de Rusia (Rusia) sigue siendo autosuficiente. Lo anterior repercute también en los hogares, porque se traduce en costos, en situaciones geopolíticamente difíciles que pueden llevarlos a pobreza energética y/o vulnerabilidad energética, por ejemplo, como lo ocurrido con los hogares en Europa por el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania, donde los costos de la energía han aumentado.

La ciudadanía, diversas organizaciones, incluso el gobierno deben tener acceso a información confiable y periódica sobre el consumo de energía de su país para pronosticar y hacer planes a futuro en su desarrollo, por lo que este estudio analizará comparativamente el consumo de energía entre Alemania, México y Rusia para encontrar diferencias y similitudes, así como determinar qué información existe sobre el consumo energético en hogares de cada país y si es suficiente para poder tomar decisiones.

METODOLOGÍA

El análisis comparativo se basó en la propuesta de Sartori en 1999 [16], que detalla los principios y procedimientos para llevar a cabo un análisis comparativo, la cual fue adaptada a este análisis energético. Sartori menciona que, para realizar la comparación se deben comparar respecto a propiedades que tienen los 3 países, en este caso se compararán los tipos de energía consumidos en los hogares de cada país, la cantidad de energía que destinan en actividades del hogar, el acceso a la información por parte de las instituciones de cada país y el acceso a información académica sobre energía de los 3 países con un análisis bibliométrico.

Los autores usarán el concepto de hogar como unidad de análisis, ya que va más allá del concepto de vivienda (el espacio físico), el hogar es el medio por el cual las familias conviven, se desarrollan, se sienten seguras y confortables [17], donde transforman la energía para cubrir sus necesidades básicas, además el consumo de energía depende también del número de habitantes, algo que en la vivienda no se contempla. La falta de energía para cubrir las necesidades energéticas de un hogar es pobreza energética, la cual está altamente asociada a la salud física y mental de sus integrantes [18] de ahí la importancia del uso de este concepto.

Como el objetivo de este trabajo fue conocer la disponibilidad de información sobre energía en los hogares se emplearon herramientas de búsqueda en línea con motores de búsqueda como Google y duckduckgo, con enfoque en sitios web oficiales gubernamentales e instituciones de cada país. A su vez, se buscaron artículos científicos sobre el consumo de energía de cada país y se hizo un análisis bibliométrico donde se elaboraron mapas de coocurrencia de palabras. Para la búsqueda de artículos científicos y la obtención de base de datos bibliométrica se consultó el sitio web de Scopus donde se usaron las siguientes ecuaciones de búsqueda: a) Mexico AND energy AND consumption b) Mexico AND energy AND consumption AND household c) Germany AND energy AND consumption d) Germany AND energy

AND consumption AND household e) Russia AND energy AND consumption f) Russia AND energy AND consumption AND household.

El procesamiento de datos se realizó mediante el software VOSviewer⁶. La búsqueda se realizó con palabras en inglés ya que la plataforma de Scopus lo solicita así, se trató de buscar con palabras en los idiomas correspondientes de cada país pero, la plataforma no mostraba resultados.

Dado que los sitios web de gobierno e instituciones de los países no proveen toda la información sobre el consumo de energía, se consultaron organizaciones internacionales. Para el caso de México se consultó información en reportes que entrega el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la SENER, para el caso de Rusia se obtuvo mayor información con reportes de los BRICS+ (Asociación inicialmente formada por Brasil, Rusia, India, China y Sudafrica) y “bp”, para Alemania se pudo consultar principalmente con fuentes institucionales del país, estas fuentes son más actuales que las de otras organizaciones de la Unión Europea como la Agencia de Cooperación de los Reguladores de Energía y la European Energy Research Alliance.

La información recabada sobre energía en los hogares que cada país provee, así como la antigüedad de sus publicaciones y la frecuencia con la cual se actualizan, fue con el fin de encontrar ventajas y desventajas de la calidad de la información que provee cada país para poder resumir en qué aspectos existe potencial de mejora en el estudio de sus mercados energéticos o qué esquemas de manejo de información puedan despertar el interés para adaptarlos entre los países analizados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis comparativo consideró el consumo de energía en general y consumo de energía en hogares. Esta sección inicia con la matriz energética de México, luego la de Rusia, posteriormente la de Alemania, después se realizaron las comparaciones de los consumos y comparaciones sobre la información y, por último, se muestra el análisis bibliométrico realizado.

Matriz energética de los Estados Unidos Mexicanos

Anualmente en México la Secretaría de Energía publica un documento llamado Balance Nacional de Energía (BNE) donde se presentan datos sobre el origen y destino de fuentes de energía primarias, secundarias y energía final, también se obtuvieron datos publicados por el INEGI, CEPAL, la SENER, y agencias de otros países que cooperan con México con las instituciones mencionados.

En cuanto a fuentes de información imprecisas, el BNE menciona que para determinar la cantidad de energía solar producida en el país se usaron datos provenientes de la organización Fabricantes Mexicanos en las Energías Renovables (FAMERC); pero, no indica qué reportes usaron, ni estas organizaciones proporcionan datos al respecto. Luego se detectó en el BNE que el uso de indicadores, que relacionan el consumo con otros parámetros como datos de productividad, no es muy frecuente. Otra imprecisión es que en el BNE no identifica a qué se destina la energía “residencial” ya que puede tratarse de cocción de alimentos, calefacción, iluminación, etc. En cuanto a la CEPAL, no establece una diferencia entre leña, carbón y queroseno para la cocción y calentamiento de alimentos.

Los reportes, las estadísticas y los estudios sobre el consumo de energía en hogares son escasos, desactualizados, incompletos e imprecisos, por ejemplo, INEGI publicó la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) en 2018 para conocer con precisión a qué se destina la energía en las viviendas en México pero, no se le ha dado continuación, por lo que sus datos están

desactualizados.

Concluidas las imprecisiones encontradas, se describen los datos sobre el consumo y producción de energía en general en México. En 2022, el país tuvo un aumento del 5.47 % en su producción de energía primaria, el 80.71 % de la energía producida fue de hidrocarburos, siendo el petróleo crudo la mayor representación en la matriz energética en un 51.0 %. El BNE reporta una independencia energética del 71.3 % [10].

Respecto a la energía empleada en los hogares mexicanos, se elaboró la Figura 1 que muestra el consumo histórico por tipo de energía en el sector “residencial” de México, los datos se obtuvieron con el Sistema de Información Energética (SIE) que pertenece a la SENER.

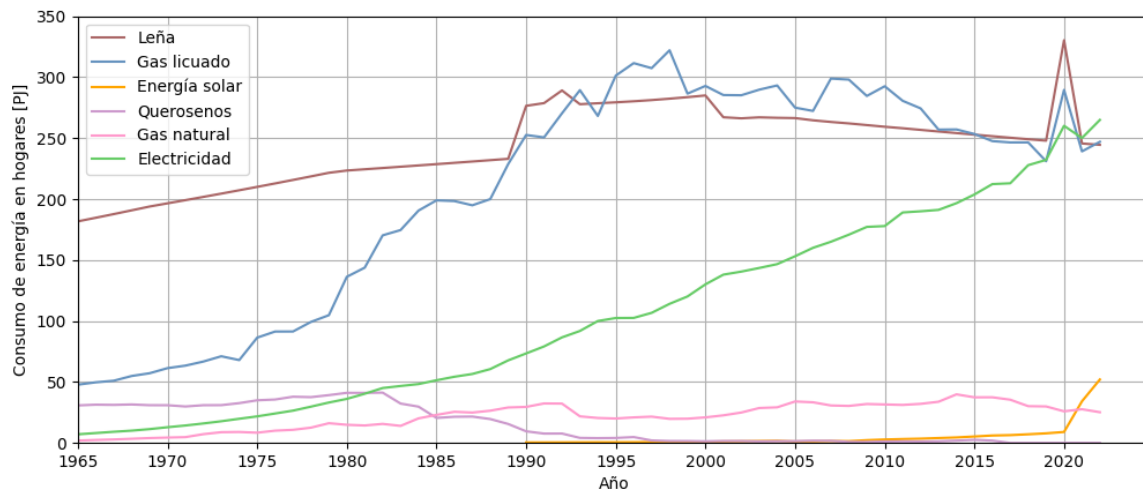


Figura 1: Tipo de energía consumida desde 1965 a 2022 en el sector “residencial” de México. Nota. Adaptado de [10].

En la Figura 1 se puede observar que el uso de electricidad sigue en aumento, mientras que el gas LP, gas natural y leña tienen una tendencia descendente en los últimos años, debido al incremento de la participación de equipos más eficientes y el uso de calentadores solares, que cubren parte de las necesidades de energía térmica en el hogar respecto al agua caliente sanitaria. La experiencia común ha mostrado que con la implementación de calentadores solares reduce el consumo de gas en el hogar en un 50 % [9]. Dicha reducción de consumo de energía fósil tiene beneficios monetarios que son alrededor de 1.23 pesos MXN para una kWh de gas LP y 1.32 pesos MXN por kWh de energía eléctrica. Con respecto a la gasolina, su costo de adquisición del producto magna fue de 22.08 pesos por litro [22]. Respecto al crecimiento de la energía solar, éste no se pudo explicar por la falta de información al respecto. En cuanto al gas LP y leña, se observó un aumento considerable en el consumo en 2020, esto debido a que fue el año donde se produjeron las restricciones por la contingencia sanitaria del COVID-19, donde los hogares se vieron limitados en sus ingresos por no poder trabajar y por no tener acceso a dichos combustibles [23].

La población mexicana en 2022 tenía 130.12 millones de personas por lo que el consumo de energía per cápita fue de 6.41 GJ. El mayor energético consumido fue la energía eléctrica, lo cual se traduce en

4.89 kWh d⁻¹ hab⁻¹ y se usa para cubrir la demanda completa en el hogar como iluminación, operación de sistemas informáticos, cocción y calentamiento de alimentos, lavado, climatización, entre otros. Respecto a fuentes de energía empleadas para la cocción y calentamiento de alimentos, la ENCEVI divide al país en 3 regiones climáticas y muestran el tipo de energía que usa cada región (Figura 2). Dicha encuesta analizó “viviendas particulares habitadas” que pueden tener uno o más hogares [24].

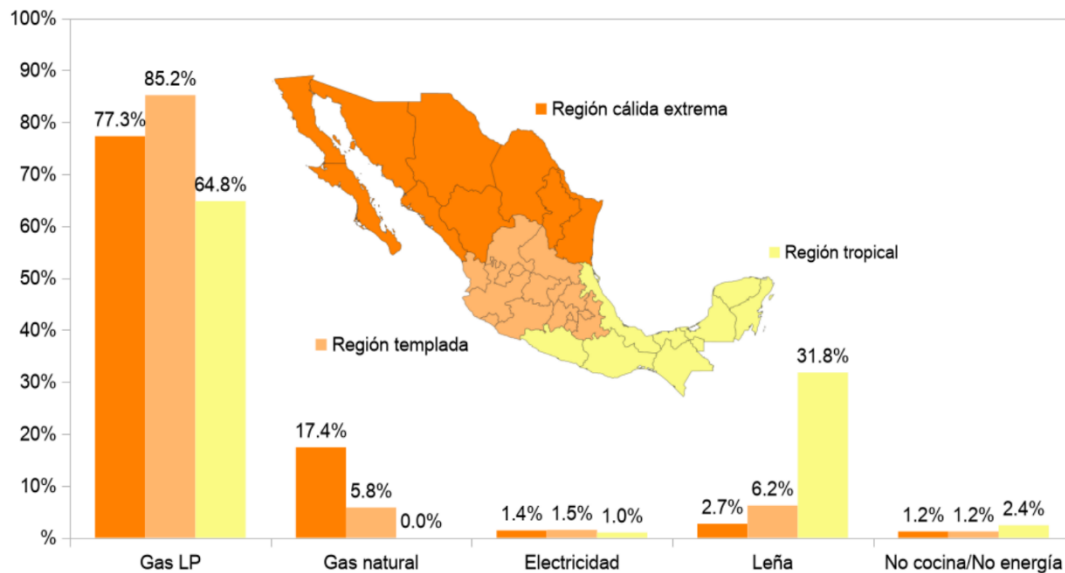


Figura 2: *Tipo de energía empleada para la cocción de alimentos en viviendas particulares habitadas por región climática en México. Adaptada de [24].*

Dentro de los aparatos que usan las viviendas particulares habitadas, INEGI identificó que el 85 % usan una estufa, siendo el 95 % de estas de gas con encendido electrónico y manual. En cuanto al uso de refrigeradores, 87.9 % de las viviendas lo tienen y el 12.1 % no. Los que tienen refrigerador, 77.4 % tiene un congelador, además el 48.9 % que poseen un refrigerador tienen una antigüedad entre 1 a 5 años, por lo que estos son más eficientes energéticamente que el resto de los refrigeradores. En el caso de lavadoras, el 70.9 % usa una, donde el 75 % de las viviendas en zonas urbanas la tiene y 57 % en zonas rurales. También, el 62 % de las viviendas usan plancha, específicamente el 64 % en zonas urbanas y 50.2 % en zonas rurales. En cuanto a ventiladores, el 45 % en zonas urbanas los usan y 41 % en zonas rurales. Por último, el aire acondicionado es usado en el 48.1 % de las viviendas en la zona cálida, 1.3 % en la región templada y 12.4 % de la región tropical.

El trabajo de Contreras, Serrano-Medrano y Masera (2022) consistió en un reprocesamiento de la base de datos derivados de la encuesta ENCEVI con el fin de poder describir el consumo de energía en hogares a partir de saturaciones de uso de equipos [25]. Aunque el reporte se publicó en 2022 es desactualizado por referirse a una base de datos de 2018. Además, se desconoce porque hay una diferencia en el consumo total de energía final en el sector “residencial” en el reporte con 790 PJ mientras que el BNE reporta que en 2018 el consumo total de energía final en el sector “residencial” fue de 760.6 PJ cuyo valor no ha cambiado en balances posteriores. Dicho sector representa el 14.1 % de la energía final del país.

Matriz energética de la Federación de Rusia

Actualmente el órgano gubernamental responsable de la política energética en Rusia es el Ministerio de Energía (ME), algunos datos estadísticos del país los ofrece el Servicio Federal de Estadística Estatal (Rosstat) y el Ministerio de Economía. Rosstat, proporciona indicadores sobre el avance en los objetivos de desarrollo sostenible del país, por ejemplo, el indicador de consumo de electricidad per cápita que en 2022 fue de 7,862.90 kWh, otro indicador es la generación de electricidad usando energías renovables que fue del 17.6 % el mismo año [26], este dato también lo confirma el informe de los BRICS+ en 2023 [27]. El indicador de consumo de combustibles y energía por empleado muestra que en 2022 cada empleado consumió 9.6 toneladas de combustible equivalente (toe). Un indicador respecto a los hogares es el acceso a internet, donde el 87.3 % de estos en 2023 contó con este servicio. En las publicaciones de Rosstat aclaran que los datos no incluyen las regiones del Donbass, es decir Donetsk, Luhansk, Zaporizhzhia y Jersón la actual región donde se está desencadenando el conflicto bélico entre Rusia y Ucrania.

La búsqueda de información sobre el consumo de energía en Rusia, mediante fuentes de gobierno e instituciones, fue limitada debido a que han restringido el acceso a algunos sitios web oficiales, también, algunos datos que se lograron recabar de sitios web oficiales están desactualizadas o incluyen escasa información relativa a los hogares, por ejemplo, el Ministerio de Energía de Rusia publicó información sobre la producción de energía indicando que en 2016 la producción de petróleo fue de 546.8×10^6 toneladas, la del gas natural fue de 691.1×10^9 m³, la del carbón fue de 407.8×10^9 toneladas métricas y se ha generado 1073.74 TWh de electricidad [28]. Otra fuente a la que se trató de acceder es el Sistema Unificado de Información y Estadística Interdepartamental (EMISS) de la Federación de Rusia; pero, actualmente su acceso no está permitido fuera del país. El acceso a información desde el punto de vista de extranjeros es limitado; pero, no implica una baja calidad y el sistema sí es transparente solo a la población rusa, es una decisión de seguridad dadas las actuales sanciones y hostilidades al país.

El estudio realizado por Mazurova y Galperova, analizó el consumo de energía de Rusia e indican que en 2020 el consumo de combustibles y recursos energéticos fue de 24228 PJ (826.9×10^6 toneladas equivalentes de carbono). Respecto al consumo de energía térmica centralizada, fue de 5022 PJ, donde el 33 % del consumo fue de los hogares, 35 % de la industria y 10 % en el sector de servicios (comercios). Respecto al sector de electricidad, se encontró que en 2020 se consumió 1085 TWh [1]. Cabe destacar que existen reportes que mencionan una tasa baja de medidores para la cuantificación del consumo eléctrico [29]. El país actualmente está dividido en 7 distritos federales que son abastecidos de energía eléctrica mediante 7 sistemas energéticos territoriales integrados (varias centrales de producción eléctrica interconectadas) y varios sistemas de energía aislados de la red principal [30]. Lo anterior es relevante para los hogares ya que cada región tiene costos de electricidad diferentes.

Un análisis de tendencias a largo plazo del consumo de energía en hogares del país, elaborado por Galperova en 2019 proporciona datos sobre el tipo de energía que usaron los hogares en los años 2005 y 2014 [31], usando estos datos se elaboró la Tabla 1. La información es incompleta respecto a que no consideran el uso de leña; pero, en Rusia sí se ocupa en comunidades rurales.

Tabla 1: Fuentes de energía usadas por hogares en Rusia en los años 2005 y 2014. Adaptada de [32].

Año	Gas	Carbón	Electricidad	Energía térmica	Otros energéticos
2005	30.7 %	2 %	21.1 %	42.5 %	3.7 %
2014	31.1 %	1.2 %	26.6 %	35.5 %	5.4 %

Respecto a informes de organizaciones internacionales, un reporte de los BRICS [27] menciona que Rusia en 2022 consumió 1,154 TWh de electricidad, y produjo 1,170 TWh de electricidad, también el reporte indica que particularmente en la producción de energía tuvo la participación de energía térmica con un total de 739 TWh, 199 TWh provenientes de hidroeléctricas, 223.7 TWh generados por energía nuclear y 8.8 TWh de otras fuentes renovables. Este reporte muestra información del año 2000, del 2013 hasta 2022, y desde 2021 no hay datos disponibles para conocer el porcentaje de participación de energía renovable en el consumo final del país, siendo el último en 2020 y fue de 3.7 %, esto mismo ocurre con el indicador de intensidad energética que fue 8.2 MJ USD^{-1} . En cuanto al petróleo, en 2021 se consumió 289,145,000 toneladas de este energético.

Otra organización llamada GlobalPetrolPrices ofrece algunos datos sobre costos de energía que están directamente relacionados con los hogares, por ejemplo, en 2023 el costo promedio de electricidad fue de 5.38 rublos por kWh, el costo del gas natural fue de 0.608 rublos/kWh y el costo de la gasolina de 95 octanos fue de 55.23 rublos/L [32]. Al momento de la realización de esta investigación el tipo de cambio es de 0.25 pesos mexicanos por rublo.

Matriz energética de la República Federal de Alemania

La información sobre la matriz energética alemana se puede consultar a través del “Statistisches Bundesamt” que es una organización similar al INEGI y publica en periodos de 2 a 3 años reportes los cuales incluyen información sobre el consumo de energía. Se puede observar que el tamaño de la sección de energía ha crecido en los últimos años proporcionando información más detallada con el uso de diversos indicadores.

Otra organización alemana que realiza balances de energía es la “Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen” (AGEB) que publica anualmente estos reportes en su sitio web [33]. Estos balances energéticos adoptan la forma de una matriz y ofrecen una visión clara de las interdependencias de la industria energética. Por lo tanto, no sólo permiten hacer afirmaciones sobre el consumo de fuentes de energía en los distintos sectores, sino que también proporcionan información sobre su flujo desde la generación hasta la utilización en las distintas áreas de producción, conversión y consumo. Esta base de información permite monitorear las tendencias en la transición energética.

Como país, Alemania depende de importaciones de energéticos que en su balance corresponde al 70 % del total de la energía demandada que suma 11,769 PJ en 2022. La distribución de las importaciones fue un 50.3 % de petróleo, 32.3 % de gas natural, 14.2 % de carbón y 4.7 % de energía nuclear. La producción interna de 3681 PJ en 2022 consiste en un 58 % por energías renovables y los no renovables internos se reducen a la explotación del carbón lignito, desde que la última mina de carbón bituminoso cerró en el 2018 y los recursos de gas natural y petróleo son despreciables [33]. Así la participación de energías renovables en el contexto de la demanda de energía primaria alcanzó un 17.2 %. La tasa de generación

de energía eléctrica a partir de energías renovables en Alemania fue de 46.3 % y es de las más altas en Europa, pero, es 1.5 veces más caro que Francia que cubre su demanda con energía nuclear [34]. Al consumidor en Alemania le cuesta 0.40 euros por cada kWh de electricidad y 0.1 euros por kWh de gas LP [35]. El costo de adquisición de la gasolina en el 2023 fue de 1.8 euros por litro [35] (para comparativas de puede considera un tipo de cambio de 19.2 pesos por euro).

Todo el sector de calor llegó a consumir 4270 PJ que se distribuyen en los energéticos gaseosos, petróleo, biomasa etc. Este sector tiene su importancia también en los hogares y hay un gran potencial de reducción por implementar un mejor aislamiento de la envolvente, aprovechamiento de la energía solar y la transición hacia sistemas de calefacción más eficientes.

Información sobre la demanda de energéticos a nivel del hogar lo proporcionan de manera detallada los reportes de “Energieeffizienz in Zahlen” (Eficiencia Energética en Números) los cuales son publicados a través del Ministerio de Economía y Protección del Clima (BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) en cooperación con el “Umweltbundesamt” (Agencia de Medio Ambiente) el cual pertenece al Ministerio de Medio Ambiente (BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz). El primer reporte salió en el 2011 en aquel tiempo por el “Umweltbundesamt” y a partir del 2018 tiene una periodicidad anual [36]. La Figura 3 muestra los tipos y cantidad de energía consumida en hogares de Alemania.

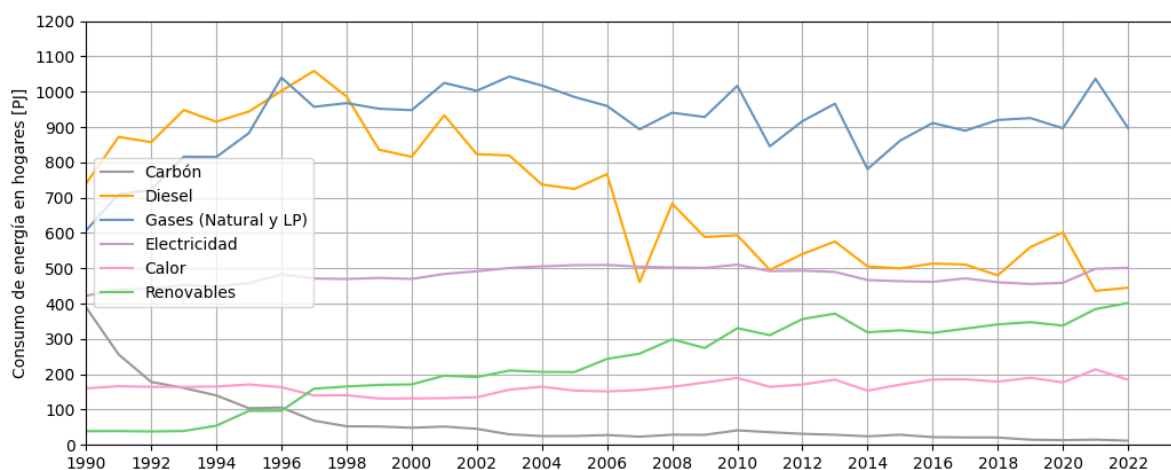


Figura 3: Energéticos consumidos en hogares alemanas entre 1990 - 2022. Adaptada de [36-37].

Además, a inicios de 2024 se pudo contar con la información de los reportes sobre la situación social en Alemania [36].

La demanda de energía en los hogares alemanes consiste en un 68.2 % por calefacción de la vivienda, aunado a eso hay demanda de calor para agua caliente y preparación de alimentos con un 15.8 y 6.0 % respectivamente. En comparación a 1990 el gasto energético para la calefacción prácticamente se ha mantenido pero debido al incremento del área total de las viviendas por si existe una reducción de la energía requerida por metro cuadrado [37]. Como el crecimiento poblacional es insignificante se registra un mayor confort, pero a costo de mayor consumo de energía.

Comparación de los consumos de energía

Iniciando con las fuentes de información, los 3 países tienen un órgano de gobierno encargado de la administración energética del país y ofrecen datos generales sobre el consumo y producción de energía. Para México y Rusia estos órganos no ofrecen información detallada sobre el consumo en hogares.

En cuanto a organizaciones nacionales encargadas de publicar información sobre el consumo de energía en hogares del país se encontró que México y Alemania cuentan con una institución que realiza esta labor, siendo INEGI y Statistisches Bundesamt respectivamente. Particularmente en México, INEGI sólo ha publicado una vez datos sobre el consumo de energía en hogares que fue la ENCEVI en 2018, lo que implica que los datos pueden ya no ser representativos para el país dado los cambios ocurridos, por ejemplo, por eventos como la pandemia por COVID-19 y el conflicto armado entre Rusia y Ucrania que ha cambiado la geopolítica y costos de la energía en el mundo. En Rusia, hasta el momento, no se ha encontrado un organismo u organización que divulgue información sobre el consumo de energía en hogares; pero, hay investigaciones científicas y algunos reportes internacionales que ofrecen algunos datos sobre el tema, a su vez, dado el conflicto bélico actual que atraviesa el país, éste ha tomado medidas para no divulgar información de manera oficial.

En cuanto al consumo de energía eléctrica se sabe que Rusia tiene la capacidad de autoabastecerse, incluso vende energía eléctrica a otros países, a comparación de México que su producción de energía eléctrica depende de gas natural importado siendo 68.7 % proviene de EE.UU., principalmente de Texas mediante gasoducto [38], el costo de electricidad está subsidiada y puede aumentar el costo por problemas en el suministro debido a decisiones políticas, problemas ambientales, entre otros. Los hogares se pueden ver afectados por esta dependencia, por ejemplo, como lo ocurrido en México por los apagones de electricidad ocurridos en 2020 debido a la congelación de gasoductos en Texas [38].

Sin duda existen diferencias en los recibos de energía eléctrica y de gas natural, por ejemplo, en México destaca la particularidad del subsidio gubernamental la cual se detalla en los diversos conceptos. El pago solo refleja el consumo y el costo por kWh consumido y se aplica el impuesto correspondiente. Alemania y México de manera grafica ubican el consumo en comparación al promedio de otros consumidores. Además, para ambos el consumo histórico es parte del recibo. En Alemania el recibo informa sobre el origen de la generación de la energía eléctrica. Como en Alemania la compra de la energía eléctrica se puede realizar a través de varios proveedores (no es un monopolio), el consumidor tendrá la posibilidad de seleccionar el servicio de preferencia tomando en cuenta los criterios de minimización de costos y/o participación de energías renovables en su suministro. Se pudo observar que existe una mayor participación en el suministro de origen renovable hacia los hogares que para los otros sectores, reflejándose en un mayor costo de energía eléctrica para los hogares. Al momento de no contar con un contrato de servicio de energía eléctrica con un proveedor de servicio de suministro de energía eléctrica estará a cargo del “Grundversorger” que es una compañía nombrada por el administrador de la red de distribución para una región por un determinado tiempo. De acuerdo con la “Bundesnetzagentur”, una organización con funciones similares a la Comisión Reguladoras de Energía (CRE) en México, reporta que el 85 % de los hogares cuentan con un contrato de suministro de energía de algún participante en el mercado libre de energía.

El suministro de gas natural en Alemania tiene el mismo esquema de suministro con un 80 % de hogares que cuentan con un contrato con algún participante en el mercado libre y de esa manera buscando las mejores ofertas para la adquisición de los energéticos. Cabe mencionar que al momento de vencer el

contrato de suministro en la extensión del servicio el proveedor establece condiciones menos favorables para el consumidor, lo que le obliga al consumidor periódicamente buscar nuevas ofertas para la adquisición de los energéticos. Hay gestores de energía que actúan entre hogar y proveedor del mercado libre para la búsqueda de mejores condiciones y cobrar sus comisiones.

Continuando con los recibos de luz, para el caso de Rusia, el costo de electricidad varía por 4 zonas principales, 2 de ellas consisten en un mercado no regulado por el gobierno de precios de energía y dos zonas donde el estado controla los precios de luz [39]. El costo medio de energía eléctrica es de 4.79 RUB kWh⁻¹, en zonas rurales el costo ronda entre 1.42 a 7.88 RUB kWh⁻¹ [40].

En México no existe la distribución de energía térmica centralizada a diferencia de Rusia y Alemania, que la usan para la climatización de la vivienda, de hecho, en México sólo el 6.3 % de las viviendas tiene alguna forma de calefacción, 46.3 % de estas son sistemas eléctricos, 29.3 % son de gas y 24.4 % son de otro tipo [17]. Así en la Figura 4, el primer segmento que corresponde a la energía que se destina a calefacción del espacio para México es del 3.3 %. Al contrario, es lo más demandante para Alemania y Rusia. Siendo las capitales de los países las regiones más pobladas del territorio, se toma como referencia la temperatura promedio en el mes de enero que es 13.5 °C para la Ciudad de México, 0.5 °C para Berlín y -9.5 °C para Moscú, lo que explica las necesidades de calefacción para cada país. En México se usan más sistemas de aire acondicionado, destinando 7.2 % de la energía total en el hogar, principalmente en el norte del país donde el 48.1 % de las viviendas en esta región climática usa estos sistemas. Es sabido que hay zonas rurales en México que no climatizan sus hogares ya sea cuando hace frío o calor, un ejemplo es la comunidad rural de Tecaxic, Estado de México [41].

Respecto a la cocción de alimentos hay una gran diferencia de energía que se destina para esta actividad en México y Alemania, 59.6 % y 6 % respectivamente como se observa en la Figura 4, la cual se explica por la mayor eficiencia que tienen los equipos eléctricos sobre estufas de gas y de leña. Aquí se refiere a la energía final y es otra relación con referencia a la energía primaria, por lo que este último se apropia más para la evaluación de una eficiencia global.

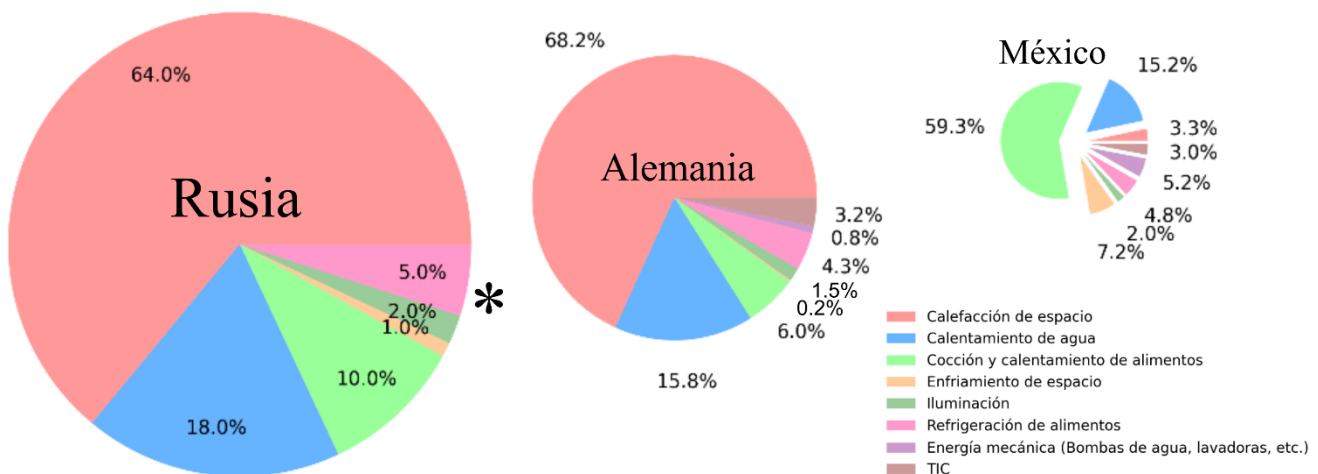


Figura 4: Consumo de energía en hogares al día por tipo de necesidad energética y país, donde el tamaño del círculo corresponde a la cantidad total de energía consumida. Elaboración propia (2024).

Con la introducción de energías renovables (se considera una eficiencia de obtención del 100 % con excepción de la energía geotérmica) cada día la brecha entre energía final y energía primaria se va reduciendo. Consecuentemente la transición energética debe de considerar hacer a un lado el uso de combustibles fósiles y leña para la cocción de alimentos por la sustitución de estufas eléctricas. La Figura 4 muestra el porcentaje de energía destinada a una actividad del hogar durante 1 día en México, Alemania y Rusia, esta gráfica se elaboró utilizando diversas fuentes de consulta, por ejemplo, para Rusia, se consultaron y calcularon los porcentajes mediante información proporcionada por Rosstat [42], The British Petroleum Company p.l.c. [43] y Galperova [31], mientras que para México se consultó a [24,25], y para el caso de Alemania se usó [36-37].

Respecto a la leña, en los países analizados se cuantifica con la menor precisión. Así las estimaciones de consumo en México forzosamente tienen que basarse en las encuestas realizadas en los hogares, debido a que este recurso se comercializa en el mercado informal y la tasa de tala clandestina alcanzó hasta un 70 % de toda la madera utilizada en México [44]. Aunque se cuente con un catastro eficiente sobre los bosques en Alemania y no se reporta sobre la tala clandestina dentro de su territorio, existen fuentes difusas que es el aprovechamiento de embalajes o podas en terrenos no clasificados como bosques. La atraktividad de la leña como combustible complementario explica el gran número de sistemas de calefacción descentralizada de aproximadamente 13 millones de unidades de acuerdo con los catastros de los deshollinadores (limpiachimeneas) [45]. Además, pueden funcionar las calefacciones descentralizadas como una alternativa en situaciones de emergencia, por ejemplo, lo que ocurrió en Viena en 2003, donde la construcción de chimeneas de emergencia ha sido obligatoria en los lineamientos para la construcción de la ciudad [46].

La importancia de la información sobre el consumo de energía radica en planear políticas, inversiones e investigaciones encaminadas a satisfacer necesidades energéticas, por ejemplo, en México a lo que más se destina energía en los hogares es la cocción y calentamiento de alimentos, por lo que una de las prioridades a atender en los hogares mexicanos es esta necesidad energética, lo anterior es importante ya que se pueden planear políticas y la normativa necesaria para combatir la pobreza energética priorizando la esfera de cocción y calentamiento de alimentos. Particularmente los ciudadanos que saben a qué se le destina más energía y dinero pueden tomar decisiones encaminadas a ahorrar o buscar alternativas de energía.

Para el caso de Alemania la importancia de conocer la información del consumo de energía y que existan opciones de donde conseguirla conlleva a que los hogares en Alemania tengan flexibilidad y amplio acceso para considerar la mejor opción para sus necesidades energéticas, lo anterior se relaciona con la reducción de la vulnerabilidad energética en los hogares como lo describe Bouzarovski y Petrova [47].

Comparación de la información

Un parámetro que se comparó es la periodicidad de los datos oficiales sobre el consumo de energía de un país, por ejemplo, en Alemania actualizan los datos sobre la demanda de energía primaria cada 4 meses y los datos sobre el consumo de energía en los hogares una vez al año (pocos meses después de iniciar el nuevo año). En el caso de México el acceso a la información sobre el consumo de energía en los hogares es limitado y desactualizado, la última y única publicación al respecto fue realizada por INEGI con la ENCEVI en 2018. En cuanto a la demanda de energía primaria en México, los datos se

publican anualmente en el Balance Nacional de Energía con aproximadamente 10 meses de retraso. En el caso de Rusia, sólo se contó con datos hasta el año 2021 sobre el balance nacional de energía, y los datos sobre el consumo de energía en los hogares es muy reducida. Particularmente en Rusia el acceso a la información ha sido limitada en los últimos años para los extranjeros por razones de seguridad; pero, sí existen otras instituciones internacionales que publican dicha información como los reportes realizados a través de BRICS+ y publicaciones académicas.

Uno de los factores técnicos que limitan la información sobre el consumo de energía en Rusia es la baja cobertura de sistemas de medición en la distribución de calor distrital y gas natural. Un posible factor observado sobre el por qué no se estudia mucho el consumo de energía en Rusia puede ser la alta disponibilidad de energía y bajos costos del mismo, a diferencia de Alemania que tiene una alta dependencia energética y altos costos del mismo por lo que el cuidado de la energía es de suma importancia, y por ende la disponibilidad de información al respecto es más amplia y periódica. En cuanto a México su dependencia energética también lo está llevando a medir el consumo de energía; pero, sin profundizar mucho en los hogares. Por lo anterior, es posible que el interés en temas de energía hace correlación negativa con el estatus de independencia energética de cada país.

Análisis bibliométrico

Dentro de la comunidad científica se encontró un mayor número de publicaciones relacionadas con Alemania con o sin la palabra “household” (hogar) en las ecuaciones de búsqueda. Para la ecuación de búsqueda sin “household” la base de datos de Scopus indicó que hubo 3360 publicaciones encontradas para Alemania, 1958 para Rusia y 1471 para México, mientras que la búsqueda realizada con la palabra clave “household” el sistema reporta 341, 86 y 127 publicaciones respectivamente. Con este análisis se deriva que el tema de consumo de energía en el hogar es menos discutido, lo que implica una estructura menos amplia de fuentes de información. La Figura 5 muestra los mapas bibliométricos generados usando las bases de datos buscadas para los 3 países con la palabra clave “household”, dichos mapas muestran las palabras claves relacionadas entre sí, donde el color amarillo representa palabras que han sido estudiadas más recientemente (alrededor de 2020) y los colores más opacos indican que son palabras clave de estudios más antiguos (2014 o menor).

Se observa que en Alemania la mayoría de los conceptos siguen estudiándose, esto se representa en el mapa bibliométrico con colores como el amarillo y verde. Dentro de los tonos amarillos para los 3 países aparece el término de “cambio climático” y los costos son más discutidos en el periodo de 2016 al 2018 (color verde).

El análisis bibliométrico también relevó que cada país estudia los conceptos en base a sus necesidades, por ejemplo, en Alemania los 3 conceptos más relacionados con el criterio de búsqueda “household” y sin considerar los conceptos que se usaron para la búsqueda, son: “energy efficiency”, “heating”, “costs”, mientras que para México fueron: “energy efficiency”, “socioeconómicos”, “greenhouse gases”. Para el caso de Rusia fueron: “energy efficiency”, “energy policy” y “costs”. Se puede observar que lo que más se ha investigado en los 3 países es sobre la eficiencia energética. Algunas palabras clave se encuentran relacionadas sólo con un país, por ejemplo, “prosumer” (Consumidor y productor) solo aparece en los estudios de Alemania y “poverty” (pobreza) solo con México.

También en Alemania se estudia más sobre tecnología vinculada a la energía e inversión al mismo a diferencia de los otros países, por ejemplo, se observan las palabras clave como “battery systems”,

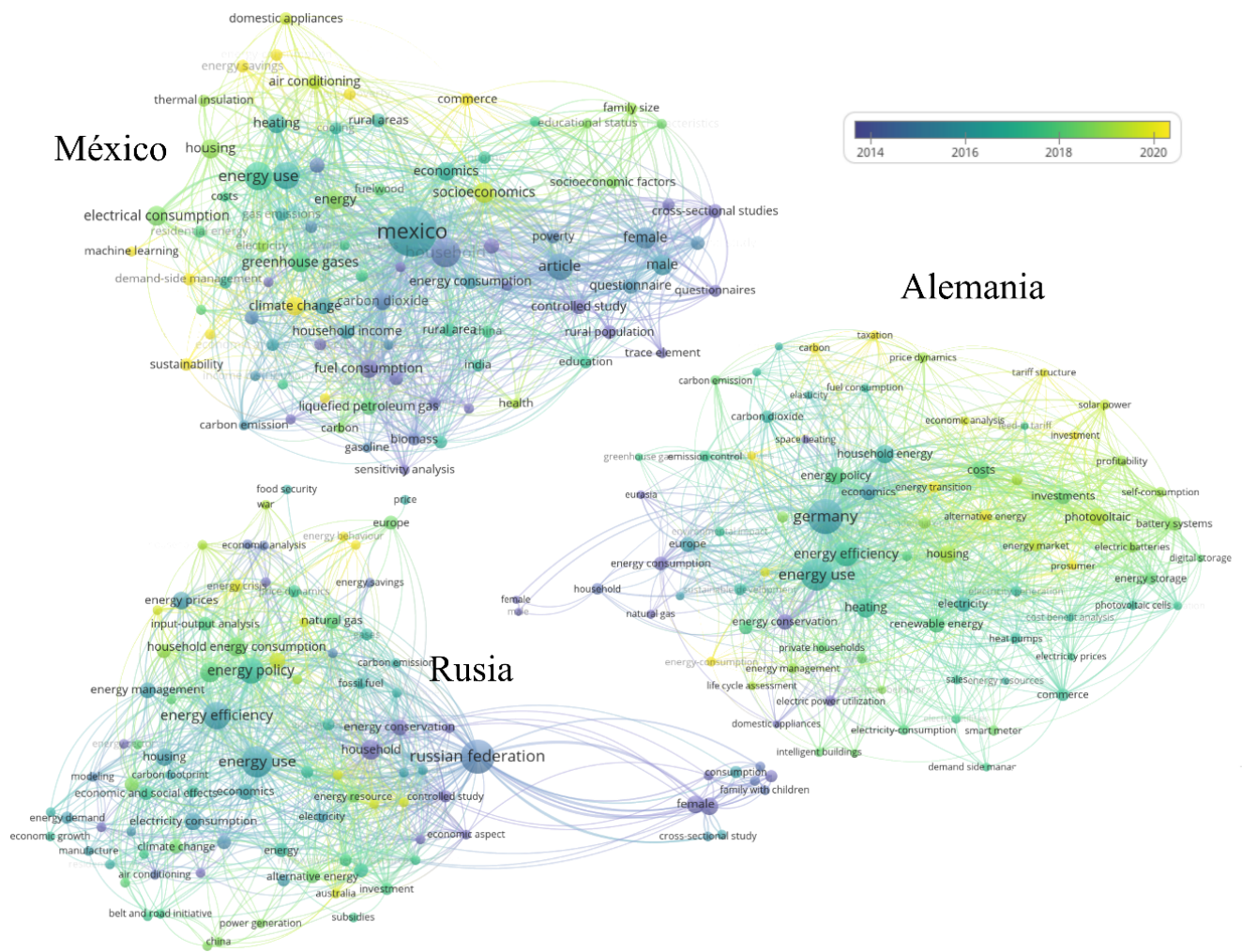


Figura 5: Mapas bibliométricos de México, Alemania y Rusia. Elaboración propia (2024).

“photovoltaic”, “energy market” e “investments”. Esto se puede explicar a razón de que Alemania es un país altamente dependiente de energía de otros países y por ello busca alternativas para satisfacer sus necesidades energéticas bajo los esquemas tarifarios presentes. Cabe mencionar que en México a nivel del hogar un “prosumer” con sistema fotovoltaico y baterías no cuenta con algún beneficio económico bajo el esquema tarifario actual, por lo que consecuentemente la comunidad científica lo investiga con menor interés.

CONCLUSIONES

Cada país tiene su forma de medir la energía y define sus propios conceptos; pero, los conceptos deben ser claros para que no haya duda sobre lo que se está midiendo y no sea tergiversado para fines propagandísticos, a su vez, los datos deben ser accesibles a investigadores que desarrollan proyectos para mejorar la calidad de vida de la población vinculado a la energía; pero, no es obligatorio hacerlo disponible a otros países ya que se trata de un asunto de seguridad nacional. Conocer el consumo de energía en hogares de un país le permite encaminar investigaciones, proyectos, programas y adquisición de recursos a satisfacer las necesidades energéticas de su población, así como conocer y combatir la pobreza energética y vulnerabilidad energética de los hogares. Se recomienda que exista en cada país alguna institución u órgano de gobierno que se dedique específicamente a profundizar en el tema sobre la estadística energética del país para conocer el estado actual. Los gobiernos necesitan de esta información para incidir en los hogares sabiendo donde se necesita calefacción o electricidad, o qué servicios de la energía no están disponibles en determinadas regiones, por ejemplo, la falta del servicio de cocción y calentamiento de alimentos, el cual se puede cubrir no sólo distribuyendo energía ya que el servicio en sí puede ser satisfecho, por ejemplo, con hornos solares, sistemas fotovoltaicos, etc. También, los gobiernos necesitan de esta información para hacer pronósticos sobre el suministro de energía, si es posible ahorrar energía implementado nuevas tecnologías renovables y limpias en algunas regiones.

Este análisis muestra la existencia de una estrecha relación entre la discusión sobre temas de energía en diferentes ámbitos y el grado de independencia energética. Como México se ha convertido en un país dependiente energéticamente de otros, se sugiere profundizar urgentemente en el conocimiento sobre el consumo de energía por medio de investigaciones y monitoreo periódico para que la administración sobre la energía del país tenga un mejor flujo de información oportuna para la toma de decisiones, ya que esta dependencia puede llevar a una crisis energética por razones geopolíticas, económicas y ambientales.

PROSPECTIVA

Este estudio también se orientó hacia las deficiencias en el manejo de la información sobre energía de los países analizados con el fin de puedan mejorar la planeación relacionada con la transición energética. De esta manera el estudio se une a otros trabajos recientes con un enfoque en la transición energética desde el punto de vista económico, por ejemplo, el de Hancevic et al. que demuestra las ventajas de las energías renovables [48], y otro trabajo que investigó los límites de las energías renovables [49].

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a María Dolores Bautista Cruz por su valiosa contribución en el desarrollo de la metodología y a Nikiforova Khristina Dmitrievna por su apoyo en la adquisición de datos.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Alexander Agüero-Shkurenkov: Conceptualización, Metodología, Análisis de datos, Redacción. **Bernd Weber, B:** Conceptualización, Metodología, Análisis de datos, Redacción. **María Dolores Bautista Cruz:** Metodología.

REFERENCIAS

- [1] O. V. Mazurova and E. V. Galperova. Energy Consumption in Russia: Current State and Forecast. *Studies on Russia Economic Development*, vol. 34, no. 25, pp. 105–114, 2022. doi: 10.1134/S1075700723010136.
- [2] Agencia Internacional de la Energía (IEA). *Global Energy Review 2020*. 2021. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>.
- [3] H. K. Schneider. Praktische Energiebedarfsforschung – Eine Volks- und Betriebswirtschaftliche Aufgabe. En H. Schaefer (Ed.), *Praktische Energiebedarfsforschung – Basis realistischer Energiestrategien*, Springer, pp. 47–54, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-81695-6_7.
- [4] H. Rolshofen. Eröffnung und Begrüßung. En H. Schaefer (Ed.), *Praktische Energiebedarfsforschung – Basis realistischer Energiestrategien*, Springer, pp. 1–4, 1981. doi: 10.1007/978-3-642-81695-6_1.
- [5] S. Alpanda and A. Peralta-Alva. Oil crisis, energy-saving technological change and the stock market crash of 1973–74. *Review of Economic Dynamics*, vol. 13, no. 4, pp. 824–842, 2010. doi: 10.1016/j.red.2010.04.003.
- [6] G. Boyle, B. Everett, and J. Ramage. *Energy Systems and Sustainability*. 2003.
- [7] T. Priest. Hubbert’s peak: the great debate over the end of oil. *Historical Studies in the Natural Sciences*, 44(1), 37–79, 2012. doi: 10.1525/hsns.2014.44.1.37.
- [8] CarbonBrief. 2019. Disponible en: <https://www.carbonbrief.org/profound-shifts-underway-in-energy-system-says-iea-world-energy-outlook/>.
- [9] E. A. Rincón-Mejía. Comunicación personal, noviembre 2023.
- [10] Secretaría de Energía. *Balance Nacional de Energía 2022*. Disponible en: <https://base.energia.gob.mx/BNE/BalanceNacionalDeEnerg%C3%ADa2022.pdf>.

-
- [11] *Gebäudeenergiegesetz*, 2024. Disponible en: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>.
- [12] T. Frasch. Erding ist ein Tiefpunkt im demokratischen Diskurs. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 11.06.2023. Disponible en: <https://www.faz.net/aktuell/politik/inland/soeder-und-aiwanger-kaempfen-in-erding-gegen-das-gebaeudeenergiegesetz-18955726.html>.
- [13] *Messstellenbetriebsgesetz – MsbG*, 2023. Disponible en: <https://www.gesetze-im-internet.de/messbg/>.
- [14] K. H. Schmidt and I. Romey. *Kohle-Erdöl-Erdgas: Chemie und Technik*. Vogel-Verlag, 1981.
- [15] AGEB. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland*, 2024. Disponible en: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/>.
- [16] G. Sartori. Comparación y método comparativo. En *La comparación en las ciencias sociales*, Madrid: Alianza Editorial, 1994, ch. 2, pp. 29–50.
- [17] S. Bachiller. Un análisis etnográfico sobre las personas en situación de calle y los sentidos de hogar. *Sociedade e Cultura*, 16(1), 81–90, 2013. doi: 10.5216/sec.v16i1.28211.
- [18] R. Calvo, C. Amigo, M. Billi, A. Cortés, P. Mendoza, R. Tapia, M. A. Urquieta, and A. Urquiza. Acceso equitativo a energía de calidad en Chile. Hacia un indicador territorializado y tridimensional de pobreza energética. 2019.
- [19] A. Michrowski. *New Energy Technology*. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6156396>.
- [20] M. A. Brown, M. D. Levine, W. Short, and J. G. Koomey. Scenarios for a clean energy future. *Energy Policy*, 29(14), 1179–1196, 2001. doi: 10.1016/S0301-4215(01)00066-0.
- [21] El Economista. 2023. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Gobierno-ajusta-cifras-y-revierte-caida-de-renovables-20230530-0001.html>.
- [22] CRE (Comisión Reguladora de Energía). 2024. Disponible en: <https://datos.gob.mx/busca/organization/cre>.
- [23] A. Bárcena. El desafío social en tiempos del COVID-19. Santiago de Chile: Copyright. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/presentaciones/desafio-social-tiempos-covid-19>.
- [24] INEGI. 2018. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>.

-
- [25] M. Contreras, M. Serrano-Medrano, and O. Masera. Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: Un análisis desde la perspectiva de usos finales. Disponible en: https://conahcyt.mx/.../Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf.
- [26] Federal State Statistics Service (Rosstat). National set of SDG indicators. 2022. Disponible en: <https://eng.rosstat.gov.ru/sdg/national>.
- [27] Reporte anual BRICS+. 2023. Disponible en: <https://brics2023.gov.za/wp-content/uploads/2023/08/SABBC-AR-30-Aug.pdf>.
- [28] Ministerio de Energía (ME). Short brief about Russian fuel and energy complex. 2017. Disponible en: <https://minenergo.gov.ru/en/russian-fuel-and-energy-complex>.
- [29] V. Roshchanka and M. Evans. Playing Hot and Cold: How Can Russian Heat Policy Find Its Way Toward Energy Efficiency? *PNNL-21695*, Pacific Northwest National Lab., 2012. doi: 10.2172/1053764.
- [30] L. Proskuryakova, E. Kyzyngasheva, and A. Starodubtseva. Russian electric power industry under pressure; Post-COVID scenarios and policy implications. *Smart Energy*, 3, 2021. doi: 10.1016/j.segy.2021.100025.
- [31] E. V. Galperova. Long-term analysis of energy consumption by household. *Studies on Russian Economic Development*, 30, pp. 146–153, 2019. doi: 10.1134/S1075700719020060.
- [32] GlobalPetrolPrices. 2023. Disponible en: https://www.globalpetrolprices.com/Russia/natural_gas_prices/.
- [33] AGBE. *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023*. Disponible en: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/04AGEB_Jahresbericht2023_20240403_dt.pdf.
- [34] Verivox. *Verbraucher-Atlas: Strompreise in Europa, 2024*. Disponible en: <https://www.verivox.de/strom/verbraucheratlas/strompreise-europa/>.
- [35] Statista. Durchschnittlicher Preis für Superbenzin in Deutschland in den Jahren 1972 bis 2024. 2023. Disponible en: <https://de.statista.com/...>
- [36] BMWK. *Energieeffizienz in Zahlen, 2023*. Disponible en: <https://www.bmwk.de/.../energieeffizienz-in-zahlen-2022.html>.
- [37] Bundeszentrale für Politische Bildung. *Datenreport 2021 – Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. 2021. Disponible en: <http://www.bpb.de/datenreport>.
- [38] La Jornada. 2021. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/.../congelamiento-de-ductos-de-gas-en-texas-provoco-el-corte-masivo-cfe/>.

-
- [39] energo. División territorial del WECM. Dependencia del precio final del suministro eléctrico de la ubicación del consumidor. Disponible en: <https://energo.blog/...>
 - [40] P4energy. 2024 . 2024. Disponible en: <https://p4energy.ru/2024/04/ee2024/>.
 - [41] A. Aguero-Shkurenkov and B. Weber. Sistema fotovoltaico autónomo con seguidor solar como propuesta a la pobreza energética de los hogares de Tecaxix, Toluco. *Papeles de Geografía*, vol. 69. Disponible en: <https://revistas.um.es/geografia/article/view/590381>.
 - [42] Federal State Statistics Service (Rosstat). Population census 2018. Disponible en: <https://eng.rosstat.gov.ru/folder/76215>.
 - [43] bp. *Energy Outlook 2023*. Disponible en: <https://www.bp.com/.../bp-energy-outlook-2023.pdf>.
 - [44] Muñoz-Lima. Deforestación en México, receta perfecta para el desastre". 2023. Disponible en: <https://www.dw.com/...>
 - [45] ZIV. *Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks*, 2023. Disponible en: <https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx>.
 - [46] A. Pech and K. Jens. *Heizung und Kühlung*. Editorial Birkhäuser, 2005. doi: 10.1515/9783990430552.
 - [47] S. Bouzarovski and S. Petrova. A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty-fuel poverty binary. *Energy Research & Social Science*, vol. 10, 2015. doi: 10.1016/j.erss.2015.06.007.
 - [48] P. I. Hancevic, H. M. Núñez, and J. Rosellón. Mexico's Energy Prospects: Gains from Renewable Sources Over A Fossil Fuel-Dominated Environment. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 11(2), 2022. doi: 10.5547/2160-5890.11.2.phan.
 - [49] L. Ferrari, O. Masera, S. Ávila, and J. R. Flores Hernández. Límites de las fuentes renovables. En A. Straffon, L. Ferrari, and O. Masera (Eds.), *Transición energética justa y sustentable: contexto y estrategias para México*, pp. 453–493, 2024.

Implementación de Autómatas Celulares en una Tarjeta FPGA

Implementation of Cellular Automata on an FPGA Card

González-Contreras, J.¹ , Jiménez-López, E.^{2*} , Lozoya-Ponce, R.E.¹ , Villagrán-Ruiz, J.C.¹ 
(*ejimenezl@uaemex.mx)

Recibido: 15-11-2024 Aceptado: 29-01-2025

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es utilizar el modelo de autómatas celulares en una aplicación específica en una tarjeta FPGA para explorar y visualizar comportamientos complejos. Los autómatas celulares son modelos matemáticos que simulan el comportamiento de sistemas dinámicos mediante reglas locales aplicadas en un espacio geométrico específico. Pueden generar patrones complejos a partir de interacciones simples, lo que los hace útiles para modelar fenómenos naturales y sociales. Una de sus principales ventajas es su capacidad de procesar datos en paralelo, reduciendo el tiempo de simulación en comparación con los enfoques secuenciales. Esto permite simular comportamientos complejos en

lapsos de tiempo muy pequeños. Estudiar sistemas dinámicos autónomos en un hardware reconfigurable ofrece una gran cantidad de aplicaciones prácticas en la ingeniería computacional y de software. La arquitectura paralela y reconfigurable de los FPGA's es ideal para explorar aplicaciones avanzadas de autómatas celulares con modificaciones en diseño y reglas de transición, que puede abordar problemas en áreas como criptografía y simulación de sistemas distribuidos.

Palabras clave: Autómatas Celulares, FPGA, Reglas de transición, Programación en Paralelo.

ABSTRACT

The objective of this work is to use the cellular automaton model in a specific application on an FPGA board to explore and visualize complex behaviors. Cellular automata are mathematical models that simulate the behavior of dynamic systems using local rules applied in a specific geo-

metric space. They can generate complex patterns from simple interactions, which makes them useful for modeling natural and social phenomena. One of their main advantages is their ability to process data in parallel, reducing simulation time compared to sequential approaches. This allows simula-

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Chihuahua, Ave. Tecnológico 2009, Chihuahua, México, CP 31200.

²Centro de Investigación y Estudios Avanzados de la Población, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Tollocan S/N, Toluca, Estado de México, México, CP 50110.



ting complex behaviors in very small-time spans. Studying autonomous dynamic systems on reconfigurable hardware offers many practical applications in computational and software engineering. The parallel and reconfigurable architecture of FPGAs is ideal for exploring advanced applications of cellular automata with modifications in design

and transition rules, which can address problems in areas such as cryptography and distributed systems simulation.

Keywords: Cellular Automata, FPGA, Transition Rules, Parallel Programming.

INTRODUCCIÓN

Los autómatas celulares (AC) son modelos matemáticos que simulan el comportamiento de sistemas dinámicos mediante reglas locales aplicadas en un espacio geométrico determinado, normalmente bidimensional o tridimensional. Este espacio se organiza en retículas, estructuras de líneas horizontales y verticales que dividen el área en celdas individuales. Estas celdas interactúan con sus vecinas de acuerdo con reglas específicas, lo que permite observar el comportamiento emergente del sistema completo [1]. La capacidad de los AC para generar patrones complejos a partir de interacciones simples los ha convertido en herramientas útiles para modelar fenómenos naturales y sociales, como procesos físicos, biológicos y sísmicos [2, 3].

Además, los AC pueden emplearse para el modelado de sistemas computacionales y matemáticos, destacando aplicaciones como la simulación de redes neuronales y la optimización de algoritmos de criptografía [4]. La configuración de estos modelos en retículas permite que el comportamiento de cada celda evolucione en función de sus estados previos y las condiciones que la rodean, como ocurre en sistemas distribuidos y adaptativos [5]. En función de los elementos y reglas de interacción, los AC pueden clasificarse en modelos unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, entre los cuales destacan aquellos que simulan sistemas sociales o dinámicas de fluidos [6].

Una de las principales ventajas de los AC es su capacidad para procesar datos en paralelo, lo que permite modelar sistemas complejos y reducir el tiempo de ejecución de simulaciones en comparación con enfoques secuenciales [7]. Esta ventaja ha impulsado el uso de hardware reconfigurable, como las FPGAs, en la implementación de estos modelos. Las FPGAs permiten una configuración de hardware programable que ofrece mejoras significativas en rendimiento y eficiencia, facilitando la ejecución de sistemas de alta complejidad en tiempo real [8].

En este contexto, el presente trabajo se centra en la implementación del autómata celular conocido como “El Juego de la Vida” de Conway en una tarjeta FPGA. Este modelo se ha popularizado por su simplicidad y por la rica variedad de patrones y comportamientos emergentes que puede generar. En “El Juego de la Vida”, el comportamiento de cada celda se define en función de sus ocho vecinos, lo que permite observar desde patrones estáticos hasta oscilaciones complejas y estados caóticos [9]. La implementación en FPGA de este tipo de modelos permite simular sus comportamientos en tiempo real, ampliando las aplicaciones de los AC en el estudio de sistemas complejos.

AUTÓMATA CELULAR (AC)

Para modelar un proceso de AC, es adecuado interpretar el espacio como una cuadrícula uniforme de dos dimensiones [10]. Los AC se conforman de cuatro características vinculadas a sus elementos fundamentales; (1) La adyacencia de las células situadas en cualquier espacio dimensional deben evidenciar relaciones de proximidad-distancia entre ellas. (2) Los Estados de cada célula tiene la capacidad de adoptar únicamente un estado de un conjunto potencial de estados, en un determinado momento temporal. (3) La condición inicial supone que la condición de las células se basa en los estados y estructuras de otras células, en particular de las más próximas. (4) La reglas de transición se refiere a las directrices que promueven las modificaciones de estado en cada célula en términos de tiempo y espacio [11].

Un arreglo uniforme, cuadrículado, usualmente infinito, compuesto por objetos iguales denominados células, puede tener n dimensiones, sin embargo, para propósitos de simulación en la ingeniería, se implementa el sistema en una, dos o tres dimensiones [12]. El AC se ilustra mediante una función tal como la que se muestra en la Ec. (1).

$$C = (L, S, V, \delta) \quad (1)$$

L representa la cuadrícula regular, S representa el conjunto limitado de todos los estados que las células pueden adoptar, V representa el conjunto limitado de células que establecen las relaciones espaciales entre ellas (por ejemplo, proximidad o vecindad de un orden específico) y δ es una función de transición que se aplica a las células en cada instante [3].

Las relaciones de vecindad espacial entre las células pueden ser representadas de la siguiente forma $c \in L$ es $V(c) = \{k_1, k_2, \dots, k_n | k_j \in L, j = 0, 1, \dots, n\}$. La relación de vecindad en una célula c se refiere al grupo de células que consideran a la célula como el centro de su área de influencia [11, 13]. Para un AC de una dimensión (es decir, espacio lineal), la vecindad de la célula estudiada se compone de las células vecinas situadas en su lado derecho e izquierdo, lo que se conoce como vecindad de radio r , tal como se muestra en la Ec. (2).

$$V(c) = (c_{i-r}, \dots, c_{i-1}, c_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+r}) \quad (2)$$

Lo esencial de un AC son las reglas de transición, también conocidas como instrucciones, que simbolizan la progresión del proceso que se pretende modelar. Las normas pueden ser deterministas o estocásticas, de carácter sencillo o muy detallado.

Usualmente, las reglas son estables, sin embargo, algunos trabajos incorporan reglas que evolucionan para representar un proceso específico y es en este momento cuando los AC se convierten en agentes de redes. Es importante destacar que las reglas se fundamentan en la forma en que se establece la proximidad entre las células. En un espacio bidimensional, la adyacencia más habitual es de cuatro células que es llamado el criterio de von Neumann, o de ocho células que es llamado el criterio de Moore. Por lo tanto, en un espacio unidimensional (por ejemplo, lineal) las células próximas pueden ser únicamente tres, las cuales necesariamente tienen frontera compartida, lo que puede generar únicamente ocho tipos de adyacencia.

Si k representa la cantidad de estados celulares (0 y 1) y n representa la cantidad de adyacencias, la cantidad de reglas de transición requeridas para el progreso de un AC de tres bits en un espacio lineal es: $k^n = 2^8 = 256$. Es decir, se cuenta con 256 reglas de transición disponibles para simular el progreso de un modelo de AC de tres bits en el espacio lineal [3].

En la Figura 1, se observa el comportamiento con ciertas reglas que se generan con tres bits. Existe un patrón de células que se repiten en espacios y lapsos de tiempo determinados, estructuras espaciotemporales en diferentes formas geométricas. Cada forma se puede observar como un fractal con una regla determinada.

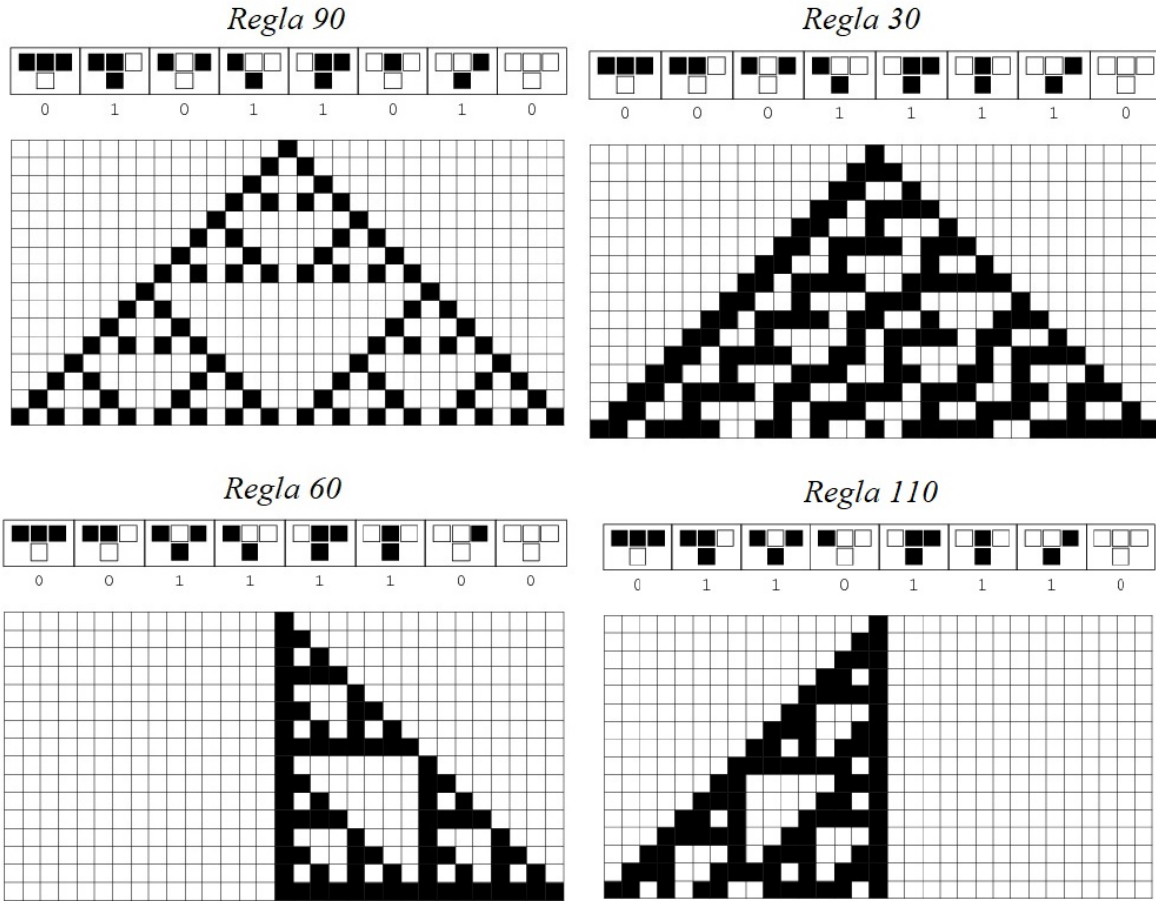


Figura 1: Comportamiento de reglas Fractales.

El Juego de la Vida es un autómata celular ideado por John Horton Conway (Liverpool, 26 de diciembre de 1937-Princeton, Nueva Jersey, 11 de abril de 2020) en 1970. Combina la noción de autómatas de estado con un concepto de cuadrícula bidimensional y un conjunto específico de reglas para la evolución de su estado. El tipo particular de Vida pertenece a la categoría de AC totalistas no isotrópicos de tipo II [14].

El término totalista representa la propiedad de las aplicaciones de reglas que consideran el estado de

cada celda con un peso igual para el estado de cada celda. De hecho, las aplicaciones de reglas se centran únicamente en el recuento de celdas vecinas activas. De acuerdo con esta configuración local, el estado de la celda central se actualiza. Los autómatas totalista no isotrópica de tipo II satisfacen por tanto las siguientes propiedades:

1. Vecindades locales con recuentos de células y pesos independientes para cada estado de célula.
2. Pesos constantes para todos los estados de célula.
3. No hay distinción entre el estado de célula 0-1 y el estado muerto "vacío".
4. Coherencia entre el uso de la simetría y las rotaciones.
5. Pesos y acciones temporalmente acotados.

La función principal del sistema que se introduce a la FPGA es acelerar los cálculos secuenciales y no paralelos necesarios para simular muchas generaciones en cuadrículas bidimensionales muy grandes. Como función extra, se añade una generación de visualización para ayudar a visualizar los resultados.

En el Juego de la Vida, el conjunto de reglas es el siguiente:

- a. Cualquier célula viva con menos de dos vecinas vivas muere, como si fuera por subpoblación, como se presenta en la parte superior de la Figura 3(a).
- b. Cualquier célula viva con dos o tres vecinas vivas sobrevive a la siguiente generación, como se observa en la Figura 3(b).
- c. Cualquier célula viva con más de tres vecinas vivas muere, como si fuera por superpoblación, como se observa en la parte inferior de la Figura 3(c).
- d. Cualquier célula muerta con exactamente tres vecinas vivas se convierte en una célula viva, como si fuera por reproducción, como se muestra en la Figura 3(d).

Es la simplicidad de estas reglas lo que ha atraído a un gran número de entusiastas de la Vida, que han encontrado configuraciones estables, oscilantes infinitas. Debido a la simplicidad del juego, ha encontrado aplicaciones en una variedad de ciencias principalmente en la ingeniería de software, software que se ejecuta en servidores de red, grupos y sociedades que impulsa la utilidad de los fractales en la ciencia.

En el Juego de la Vida de Conway, se muestra en la Figura 2, la vecindad de una célula se determina típicamente considerando las ocho células que la rodean inmediatamente: arriba, abajo, izquierda, derecha y las cuatro diagonales. Estas ocho células son vecinas directas de la célula central en el manejo.

Las reglas del Juego de la Vida de Conway son bastante simples, pero generan una sorprendente complejidad. (1) Nacimiento: se reemplaza una célula muerta por una viva si dicha célula tiene tres vecinos vivos como se muestra en la Figura 3(d). (2) Muerte: se reemplaza una célula viva por una muerta si dicha célula no tiene más de un vecino vivo (muerte por aislamiento) o si tiene más de 3 vecinos vivos (muerte por sobrepoblación) como se muestra en la Figura 3(c). (3) Supervivencia: una célula viva permanecerá en ese estado si tiene dos o tres vecinos vivos como se muestra en la Figura 3 (b).

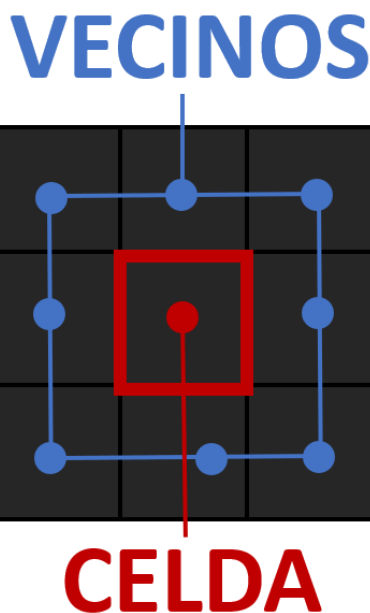


Figura 2: *Vecindad de la célula en el Juego de la Vida.*

APLICACIÓN DE FPGA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL JUEGO DE LA VIDA

Si bien los estudios avanzados y las simulaciones que se basan en AC para fines científicos pueden aprovechar los microprocesadores modernos de alto rendimiento, la investigación basada en matrices de AC a menudo enfrenta los siguientes desafíos:

- (1) El tamaño de la cuadrícula que podemos simular está limitado por la memoria del microprocesador en uso, ya que cada estado de celda requiere espacio de memoria.
- (2) Los modelos basados en reglas de transición dan como resultado una gran cantidad de operaciones de comparación local para la evaluación y transiciones de estado para el seguimiento fino del espacio vital, lo que resulta en una gran carga temporal para la programación y procesamiento de los cálculos.
- (3) Se necesita una respuesta extremadamente detallada a los datos y las operaciones de control para una implementación del sistema eficiente y de alto rendimiento.
- (4) Un esquema de acceso que minimice los retrasos de comunicación entre celdas vecinas.

Los FPGA modernos proporcionan una cantidad significativa de elementos lógicos y bloques especializados para operaciones matemáticas. Es posible crear una matriz de más de mil celdas por FPGA con un rendimiento que depende del mecanismo de transición de celdas y de los FPGA. También es posible implementar casi cualquier regla de transición de celdas utilizando lenguajes de descripción de hardware. Utilizando el ejemplo de adición de acarreo de ondulación, la tasa de actualización de celdas del modelo

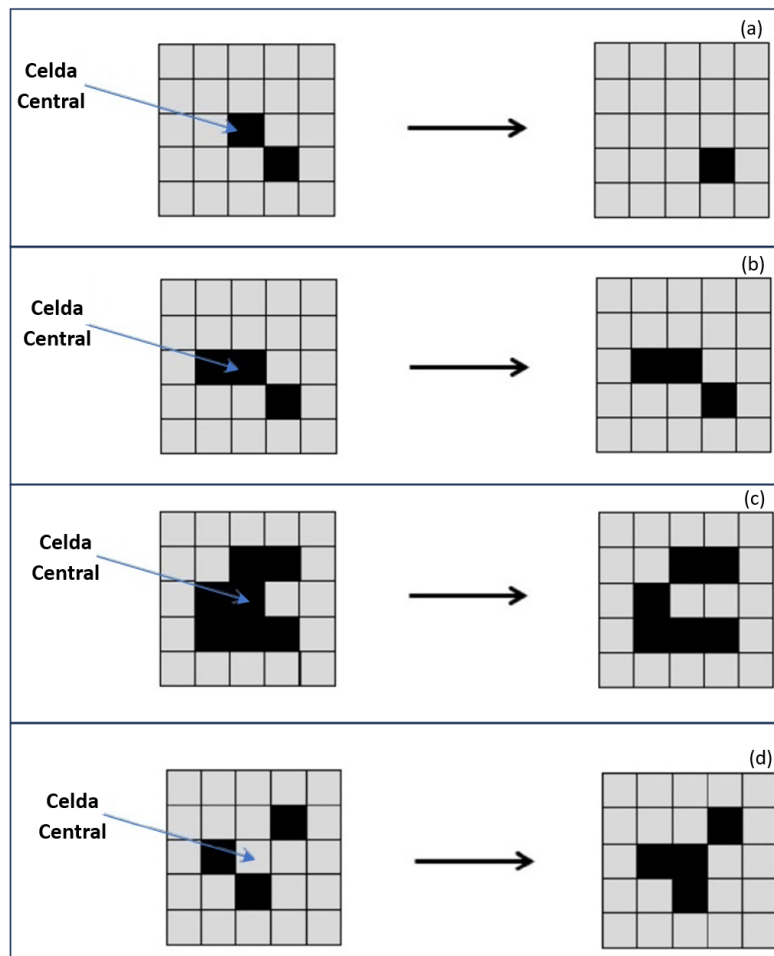


Figura 3: *Patrones del Juego de la Vida.*

de red sin escala fue de más de 10 GHz por grupo de 512 celdas de FPGA, lo que demuestra un alto grado de paralelismo. Gracias al pequeño requisito de área necesario para la memoria dedicada del FPGA y al posible paralelismo extremo de las celdas que puede emplear un FPGA normal, la cantidad de memoria requerida en un procesador de AC basado en FPGA puede ser significativamente menor que la de un sistema paralelo de microprocesadores modernos.

La tarjeta que utiliza este trabajo es la DE0-CV de Intel/Altera. El FPGA es un cyclone V, modelo 5CEBA4F23C7N. Dicho FPGA posee 49,000 elementos lógicos programables, 3080 Kbits de memoria embebida y 4 PLLs fraccionales. Para configurar la tarjeta, esta posee un dispositivo EPCS64 de configuración serial en el FPGA, interfaz USB tipo B en la tarjeta. Soporta modos de configuración JTAG y AS. En cuanto a memoria, posee 64 MB de memoria SDRAM con un bus de datos de 16 bits. Esta es una tarjeta de desarrollo, por lo que contiene una serie de entradas y salidas para realizar proyectos [15].

El programa Quartus II es utilizado para realizar Ingeniería de Software, siendo herramienta de desarrollo de Intel, para dispositivos FPGA. Cuenta tanto con opciones de diseño como de depuración, simulación y programación. En este entorno se pueden desarrollar proyectos de ingeniería de software de varias maneras, tanto en forma esquemática (i.e. con diagramas de bloques) como mediante lenguajes de descripción de hardware. Quartus II provee todas las herramientas necesarias para realizar proyectos en distintos FPGA, por lo que, si se desea cambiar de un FPGA a otro, únicamente es necesario cambiar el dispositivo seleccionado en la configuración, y asignar los pines correspondientes en las entradas y salidas del nuevo dispositivo.

Al modelo de ingeniería que se propone se agrega Verilog está definido formalmente por el estándar de la IEEE 1364. Es un lenguaje de descripción de Hardware (HDL), mediante el cual es posible configurar dispositivos electrónicos programables. Al ser un HDL, la función de Verilog es describir el hardware que será sintetizado en el dispositivo electrónico, así como sus interconexiones, para conseguir el comportamiento deseado. Por ser un lenguaje, tiene una sintaxis específica a utilizar para describir el comportamiento deseado; es importante recalcar que Verilog distingue diferencias entre minúsculas y mayúsculas, por lo que tener cuidado en este sentido es indispensable, ya que puede provocar tanto errores de compilación, como errores lógicos. Otra característica importante en Verilog a tomar en cuenta, es que es ejecutado de manera paralela, a diferencia de lenguajes de programación estructurales, como "C" que se ejecutan secuencialmente [17].

La Matriz de gráficos de video (Video Graphics Array, VGA) es un estándar de gráficos de computadora introducido por IBM en 1987. Proporciona una resolución de pantalla de 640x480 píxeles con hasta 16 colores visibles simultáneamente en su paleta de 256 colores. La VGA ha sido un estándar ampliamente adoptado en la industria de la informática personal y ha evolucionado a través de varios estándares posteriores [17].

Una señal de video VGA contiene 5 señales activas: para sincronización de video: horizontal y vertical; y para asignar color: rojo (Red), verde (Green) y azul (Blue). Al cambiar los niveles analógicos de las tres señales RGB, se generan otros colores. Se realiza un rastreo sobre la pantalla de visualización en una secuencia de líneas horizontales para generar una imagen. La información de color RGB en la señal de video se utiliza para controlar la intensidad de los haces de electrones. Este proceso comienza en el origen (0,0) y repite el pintado de los píxeles de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo tantas veces como sea necesario, hasta que el ojo humano no perciba saltos visuales.

El Juego de la Vida se implementó en una matriz de celdas, se utiliza una matriz de 64x48 celdas,

donde cada celda está representada por un bit como se muestra en la Figura 4.

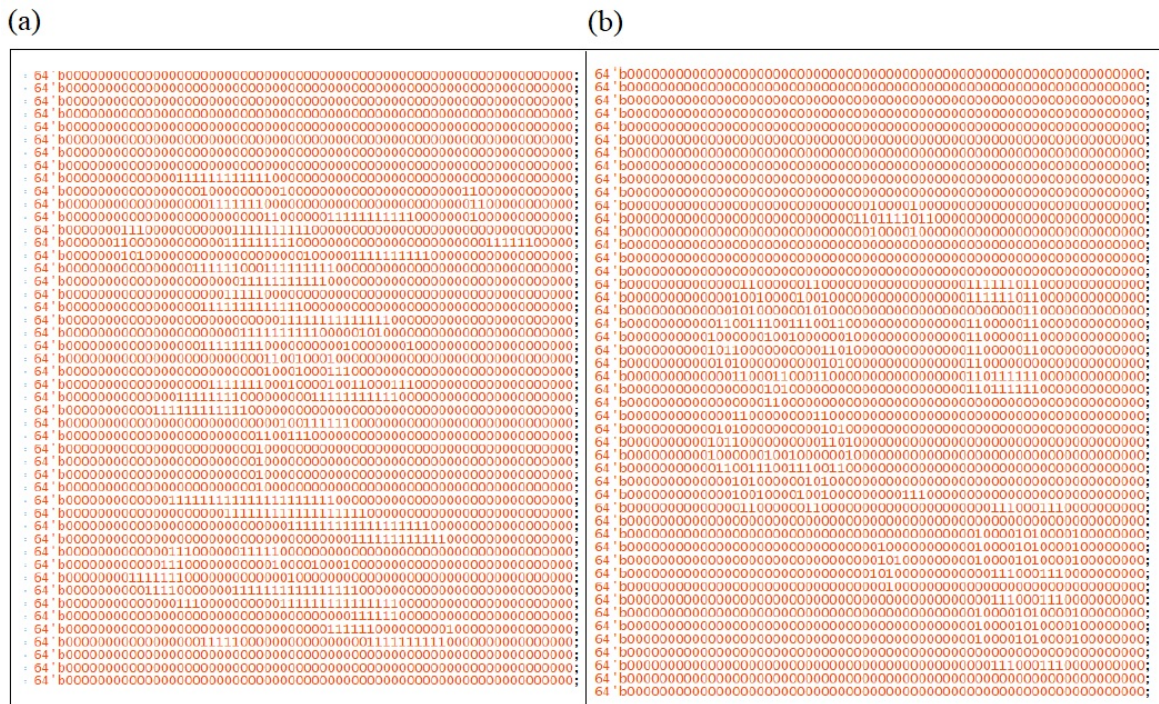


Figura 4: (a) Matriz inicial precargada. (b) Patrones oscilatorios.

Se cargaron en las matrices de algunos patrones como se muestra en la Figura 4 (condiciones iniciales). Con un botón externo se realizan cambios de patrones para ver el comportamiento de cada uno de ellos, para esta implementación se colocaron seis condiciones iniciales. La parte medular del Juego de la Vida es la lógica que actualiza en el estado de cada celda con base en sus vecinos. Para cada celda, se contaron los números de vecinos vivos. Esto se hizo utilizando bucles anidados que iteran sobre las posiciones adyacentes (incluyendo diagonales) como se presenta en la Figura 5 incisos (a) y (b).

Dentro del módulo se incluye un segundo divisor de frecuencia que controla el tiempo de transiciones para cada una de las celdas, parte de la ingeniería de software, como se muestra en la Figura 6.

Al contar los vecinos vivos, se aplica una regla del juego de la vida, para determinar el estado futuro de la celda y guardarlo en una matriz temporal. Se actualiza la matriz principal (ver Figura 7).

Se crea un submódulo que determina la posición en un par ordenado (x, y) . Se selecciona el color blanco para celda viva y color negro en caso contrario (Figura 8).

En resumen, el proceso de sinterización de la ingeniería de software se implementa con un consumo promedio del 50 % de los recursos totales de la tarjeta FPGA. Esto se debe al uso de sistemas secuenciales y arreglos dimensionales en hardware. Al generar el Modelo RTL (Register Transfer Level) del sistema en Quartus después de la síntesis, muestra el diagrama de la Figura 9.

Una vez diseñada la ingeniería de la aplicación y reconocidas las características de las estructuras y su comportamiento en la tarjeta FPGA, se destacan varios aspectos clave de la aplicación estudiada. En

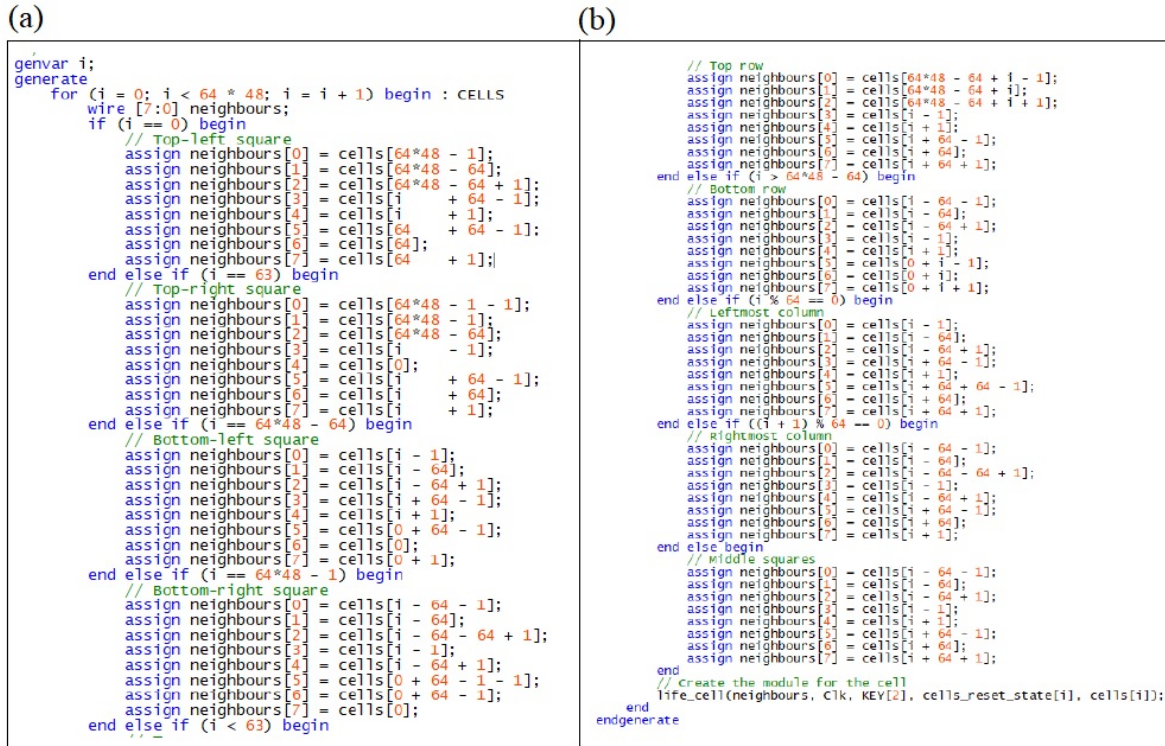


Figura 5: Programación de la matriz precargada, condiciones iniciales.

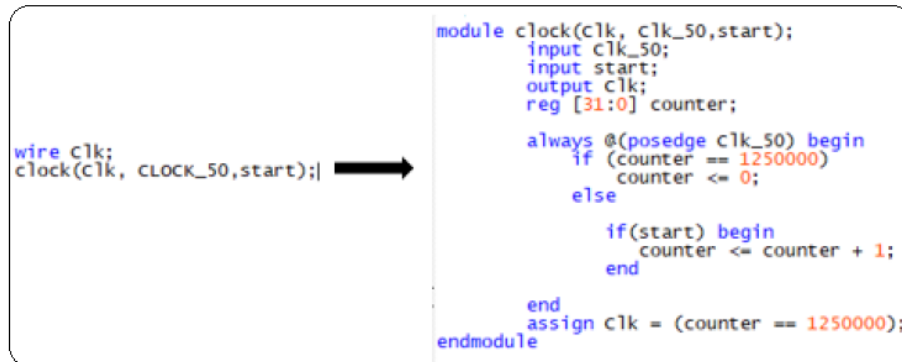


Figura 6: Descripción del Divisor.

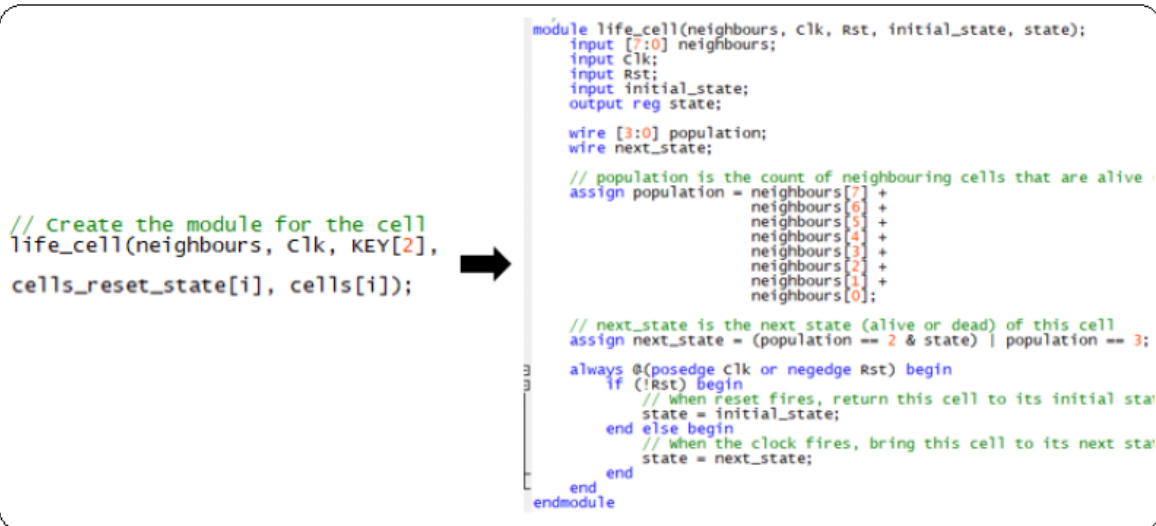


Figura 7: Submódulo y descripción para determinar el futuro de la celda.

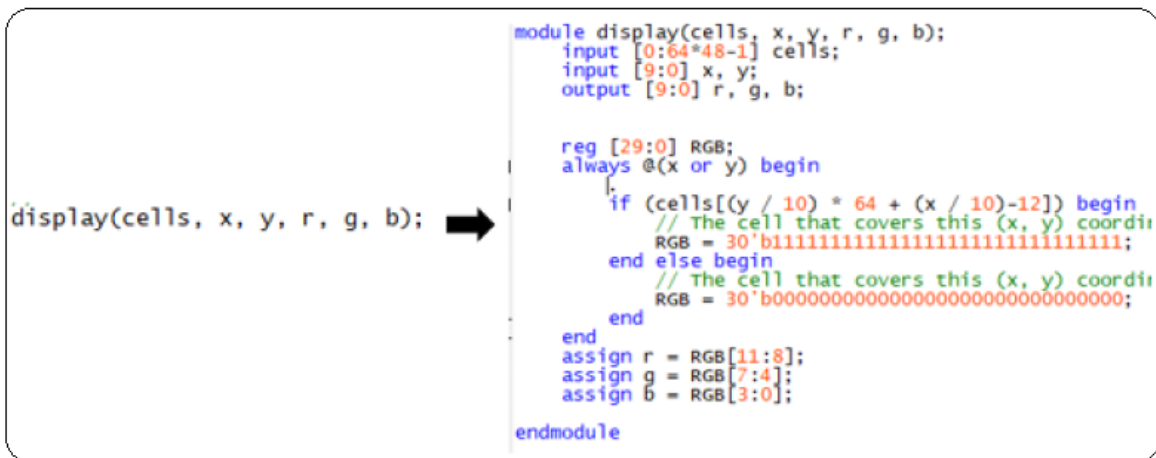


Figura 8: Submódulo para determinar posición y color.

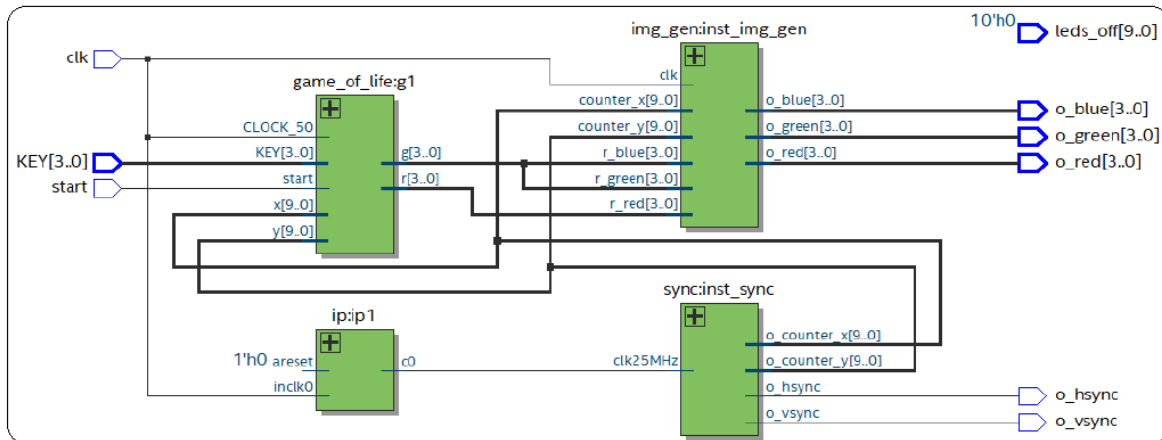


Figura 9: Diagrama RTL obtenido.

primer lugar, los autómatas celulares (AC) pueden modelarse para una implementación concurrente en circuitos secuenciales, lo que permite aprovechar las capacidades inherentes de los FPGA en términos de flexibilidad, procesamiento paralelo y velocidad. Estas características, como lo han señalado Sepúlveda et al [18] y Ladino Vega y Cancino de Greiff [19], convierten a los FPGA en dispositivos idóneos no solo para el diseño de ASICs, sino también para aplicaciones avanzadas como simulación, depuración y procesamiento de señales digitales, donde destacan casos de uso como video, que es el enfoque principal de este trabajo.

En comparación con otras plataformas, como procesadores tradicionales o sistemas puramente basados en software, los FPGA sobresalen debido a su capacidad para realizar cálculos en paralelo directamente en hardware, lo que elimina los cuellos de botella asociados al procesamiento secuencial en CPU o GPU. Además, el uso de lenguajes de descripción de hardware como Verilog facilita la personalización de diseños específicos, permitiendo a los desarrolladores optimizar tanto la velocidad como el consumo energético, tal como lo destacan ambos estudios [18, 19].

Otra ventaja clave del uso de FPGA, como lo demuestra esta implementación, es el manejo eficiente de salidas VGA, que permite controlar y actualizar píxeles de manera precisa y en tiempo real. Esto asegura una experiencia visual fluida y un rendimiento óptimo, incluso en aplicaciones complejas como la simulación de AC. En el modelo propuesto, este diseño permite realizar cálculos paralelos fuera de la PC y controlar dispositivos con un mayor nivel de detalle y precisión en los AC seleccionados. Las capturas mostradas en la Figura 10 ejemplifican el funcionamiento del sistema implementado en una pantalla VGA.

CONCLUSIONES

La implementación del autómata celular conocido como el “El Juego de la Vida” en una tarjeta FPGA ha demostrado ser una herramienta efectiva para explorar y visualizar los comportamientos complejos que pueden emerger de reglas locales simples. Este proyecto no solo ha permitido estudiar la dinámica de estos sistemas en un entorno de hardware reconfigurable, sino que también ha mostrado el potencial de los AC para aplicaciones prácticas en el ámbito de la ingeniería.

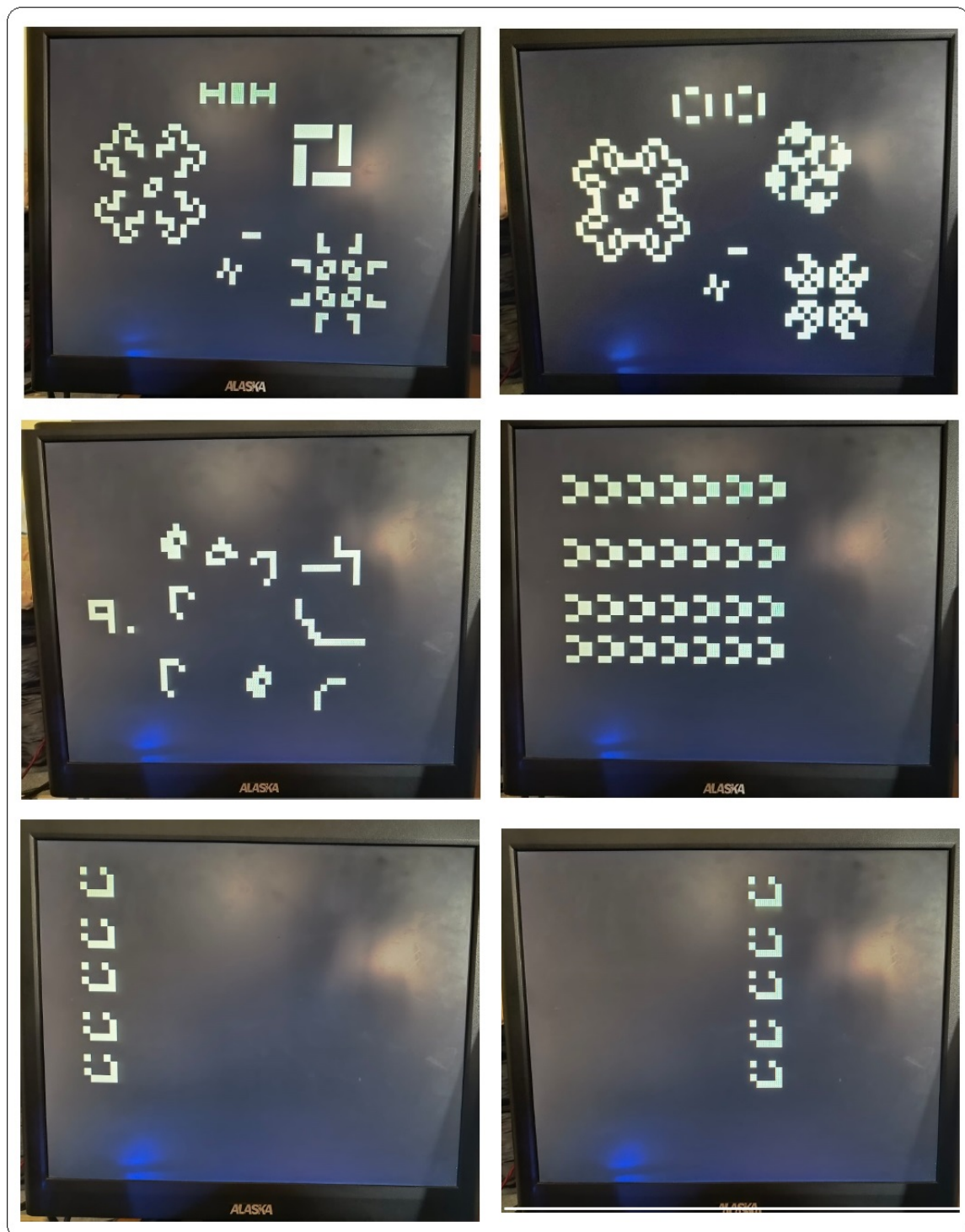


Figura 10: *Patrones aleatorios en el Juego de la Vida.*

Además, este tipo de implementaciones resulta especialmente beneficioso en el contexto educativo, donde proporciona a los estudiantes de ingeniería electrónica una experiencia práctica y visual que facilita la comprensión de conceptos fundamentales de AC. La posibilidad de observar la evolución de patrones en tiempo real en un FPGA permite a los alumnos desarrollar una intuición más profunda sobre la interacción de celdas y el impacto de las reglas locales en el comportamiento global del sistema.

Este trabajo también puede servir como base para proyectos más complejos y especializados. La arquitectura paralela y reconfigurable de los FPGA's es idónea para explorar aplicaciones avanzadas de AC, tales como sistemas de encriptación y cifrado, generación de secuencias pseudoaleatorias y modelado de redes neuronales. Con modificaciones en el diseño y en las reglas de transición, es posible expandir el modelo para abordar problemas en áreas como la criptografía y la simulación de sistemas distribuidos.

Cabe destacar que la implementación de AC en FPGA's no solo contribuye al conocimiento en ingeniería de sistemas y hardware, sino que también ofrece un enfoque didáctico y adaptable para la enseñanza y el desarrollo de proyectos avanzados, potenciando tanto la comprensión académica como la innovación aplicada en el ámbito de la ingeniería electrónica.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Jazmín González Contreras: Conceptualización, Metodología, Software, Redacción-Preparación del borrador original y Edición. **Eduardo Jiménez López:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Software, Curación de datos, Redacción-Preparación del borrador original y Edición. **Ricardo Eliú Lozoya Ponce:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Software, Curación de datos, Redacción-Preparación del borrador original y Edición. **Julio César Villagrán Ruiz:** Supervisión, Revisión y Edición.

REFERENCIAS

- [1] D. Alejandro and R. Gómez. Descripción y Aplicaciones de los Autómatas Celulares. 2011. Disponible en: https://delta.cs.cinvestav.mx/~mcintosh/cellularautomata/Summer_Research_files/Arti_Ver_Inv_2011_DARG.pdf.
- [2] B. L. Benoso and C. Yáñez Márquez. Autómatas celulares alfa-beta. *Computación y Sistemas*, 16(4), pp. 471–479, 2012. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61524670009>.
- [3] E. Jiménez, T. Chávez, and C. Garrocho. Modelando la expansión urbana con autómatas celulares: aplicación de la Estación de Inteligencia Territorial (Christaller). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica, Geosig*, 12, pp. 1–26, 2018. Disponible en: <https://acortar.link/7gMbwZ>.
- [4] I. Dario and L. Vega. AUTÓMATAS CELULARES EVOLUCIONADOS SOBRE FPGA. Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, 2012. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12733/LadinoVegaIvanDario2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

-
- [5] M. H. Kirkeby and M. Schoeberl. Towards Comparing Performance of Algorithms in Hardware and Software. 2022. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2204.03394>.
- [6] B. Martin and P. Solé. Pseudo-random Sequences Generated by Cellular Automata. 2008, pp. 401–410. Disponible en: <https://hal.science/hal-00305407v1>.
- [7] R. Rechtman. Una introducción a autómatas celulares. *Ciencias*, 24, pp. 23–29, 1991. Disponible en: <https://www.revistacienciasunam.com/es/172-revistas/revista-ciencias-24/1572-una-introducci%C3%B3n-a-aut%C3%B3matas-celulares.html>.
- [8] A. C. Rojas and Á. Rojas Matas. Autómatas celulares y aplicaciones. *UNIÓN Revista Iberoamericana de Educación Matemática*, 46, pp. 33–48, 2016. Disponible en: <http://www.fisem.org/web/unionhttp://www.revistaunion.org>.
- [9] T. Smilkstein, K. K. Tati, P. Barve, M. L. Hai, K. Sajjapongse, and D. K. Sharma. An evolutionary algorithm testbed for quick implementation of algorithms in hardware. En *2009 IEEE Workshop on Evolving and Self-Developing Intelligent Systems*, pp. 51–57. IEEE, 2009. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-48302-1_31.
- [10] E. Jiménez-López and L. A. López-Rivera. Artificial neural networks in the application of the growth of the urban sprawl. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(21), pp. 109–119, 2023. doi: <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i21.10565>.
- [11] E. Jiménez López. Deep Learning in the Expansion of the Urban Spot. En *Study of Complex Systems and their Applications Conference*, pp. 37–51. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-51224-7_3.
- [12] E. Jiménez-López. Inverse filter in the growth of urban sprawl with cellular automata model. En *Complex Systems and Their Applications: Second International Conference (EDIESCA 2021)*, pp. 231–247. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-02472-6_12.
- [13] E. Jiménez López. Cadenas de Markov espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017–2031. *Economía, sociedad y territorio*, 19(60), pp. 109–140, 2019. doi: <https://doi.org/10.22136/est20191324>.
- [14] S. A. Sanfélix, M. B. Camps, and M. Christodoulou. Landscape Design Methodology: Pattern Formation Through the Use of Cellular Automata. *Temas de Disseny*, (35), pp. 26–41, 2019. doi: <https://doi.org/10.46467/TdD35.2019.26-41>.
- [15] Terasic Technologies. *DE0-CV user manual*. Disponible en: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=163&No=921&PartNo=4>.

-
- [16] E. Schkufza, M. Wei, and C. J. Rossbach. Just-in-time compilation for Verilog: A new technique for improving the FPGA programming experience. En *Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, pp. 271–286, 2019. doi: <https://doi.org/10.1145/3297858.3304010>.
 - [17] D. G. Costa. Visual sensors hardware platforms: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20(8), pp. 4025–4033, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2952447>.
 - [18] J. Sepúlveda, C. Camargo, and S. Bolívar. Metodología de Implementación de Autómatas Celulares en FPGA. 2016. Disponible en: <https://silo.tips/download/metodologia-de-implementacion-de-automatas-celulares-en-fpga>.
 - [19] I. D. Ladino Vega and H. F. Cancino de Greiff. Autómatas Celulares Evolucionados sobre FPGA. Pontificia Universidad Javeriana, 2012. Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/12733>.

Desempeño Sísmico de Edificios de Concreto Reforzado Estructurados a Base de Marcos Resistentes a Momento y Contravientos Restringidos al Pandeo

Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings Structured with Moment-Resistant Frames and Buckling-Restrained Braces

Félix Soto, A.¹ , Reyes Salazar, A.² , Santos Amador, O.¹, Llanes Tizoc, M.D.² , Trasviña Soberanes, J.D.¹, Valenzuela-Beltrán, F.^{2*} 
(*fvalenzuelab@uas.edu.mx)

Recibido: 21-01-2025 Aceptado: 26-03-2025

RESUMEN

Esta investigación tiene como propósito evaluar el desempeño sísmico de edificios de concreto reforzado ubicados en suelo blando de la Ciudad de México, en términos de las pérdidas económicas esperadas. Los modelos son a base de marcos resistentes a momento y alternativamente se utilizarán sistemas disipadores de energía, en este caso contravientos restringidos al pandeo. Se realizan análisis dinámicos no lineales para diferentes niveles de intensidad sísmica con el objetivo de obtener parámetros de respuesta estructural como distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso. Por último, se

evaluará el desempeño sísmico de los edificios mediante el uso de la segunda generación de metodologías de diseño sísmico basado en desempeño del FEMA P-58, para obtener resultados en términos de pérdidas anuales esperadas (EAL) y realizar un análisis de costo-beneficio para identificar las mejores opciones de diseño.

Palabras clave: Contraviento Restringido al Pandeo, Diseño Sísmico Basado en Desempeño, Pérdidas Anuales Esperadas, Costo de Ciclo de Vida.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the seismic performance of reinforced concrete buildings located on soft soil in Mexico City, in terms of expected economic losses. The models are based on moment-

resisting frames and alternatively, energy dissipation systems will be used, in this case buckling-restrained braces. Nonlinear dynamic analyses are performed for different levels of seismic intensity to

¹Estudiante de posgrado, Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.

²Profesor, Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México.



obtain structural response parameters such as inter-story drifts and floor accelerations. Finally, the seismic performance of the buildings will be evaluated using the second generation of FEMA P-58 performance-based seismic design methodologies, to obtain results in terms of expected annual losses

(EAL) and perform a cost-benefit analysis to identify the best design options.

Keywords: Buckling Restrained-Braces (BRBt's), Performance-Based Seismic Design, Expected Annual Losses, Lifecycle Cost.

INTRODUCCIÓN

Los sismos son fenómenos naturales que históricamente han provocado cuantiosos daños materiales y de pérdidas de vidas humanas en diversas partes del mundo, Ciudad de México 1985 y 2017. Es por ello por lo que la gran mayoría de los manuales y códigos de construcción proveen lineamientos para la consideración del riesgo sísmico en el diseño de las estructuras. La mayoría de los códigos de construcción tienen el objetivo primordial de brindar seguridad, esto tomando como meta que las estructuras cumplan con un determinado límite de distorsiones permisibles indicados en cada código de construcción. Sin embargo, aunque el enfoque de diseño actual sigue teniendo como prioridad evitar que las estructuras sufran grandes daños o colapso estructural ante un espectro sísmico de diseño, lo cual en la mayoría de los casos presenta resultados adecuados, aún existen una gran cantidad de incertidumbre al momento del diseño y evaluación del comportamiento de estructuras sismo resistentes. Debido a esto, además del enfoque tradicional de diseño, se han ido tomando en consideración otros parámetros de interés (pérdidas económicas, tiempos de reparación, pérdida de vidas, impacto ambiental), los cuales están tomando cada vez más relevancia en los enfoques de diseño actuales.

En años recientes, la ingeniería ha desarrollado diversas herramientas innovadoras con el fin de mejorar el comportamiento sísmico de las estructuras. Uno de los principales avances fue el desarrollo de la metodología del Desempeño Sísmico Basado en Desempeño, o mejor conocido como PBSB (por sus siglas en inglés Performance-Based Seismic Design). Este método se puede definir como la práctica de diseñar estructuras con la expectativa de que estas cumplan con cierto nivel de desempeño cuando son sometidas a movimientos sísmicos. Esta metodología tuvo sus orígenes en los años 70's, debido al sismo de San Fernando 1971. Uno de los principales avances de este método de diseño surgió a mediados de los 90's con la publicación del FEMA 273 y FEMA 274 en donde se establecieron formalmente estados de desempeño o estados límites que no debían de ser excedidos, estos se encuentran asociados a umbrales de demandas de fuerzas y deformaciones (Figura 1).

En el inicio de los códigos o reglamentos de construcción, estos tenían como objetivo evitar que la estructura colapsara ante un determinado nivel de intensidad sísmica. En la actualidad, este enfoque se continúa siendo el parámetro principal para considerar, sin embargo, algunos reglamentos actuales consideran nuevas filosofías como la de diseño sísmico basado en desempeño (NTC-2023, FEMA P58, ASCE 7/16), y solo unos pocos toman en consideración otros parámetros de interés (pérdidas de vidas, pérdidas económicas, interrupción de actividades de la edificación, entre otros). Después de la publicación de la primera generación de metodología de diseño basado en desempeño, se comenzó a trabajar en una nueva metodología que tomara en cuenta los indicadores mencionados anteriormente, por lo cual el Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) desarrolló una metodología que toma en consideración diversos parámetros que la anterior no tomaba en cuenta, como la incertidumbre en la intensidad

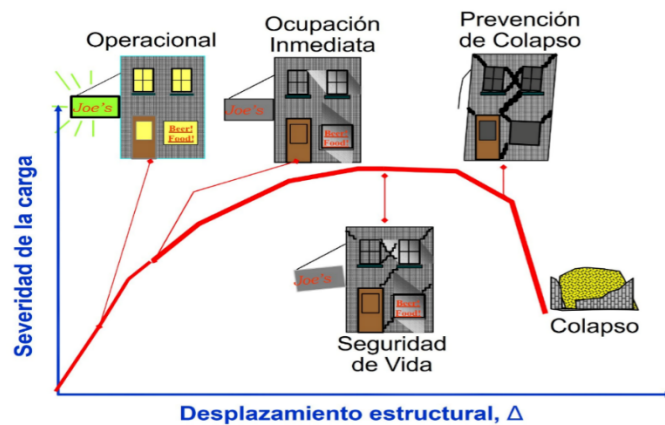


Figura 1: Estados límites propuestos en la primera generación de metodologías de diseño por desempeño.

sísmica, la respuesta estructural, el daño que sufren los componentes dentro de la estructura, entre otros. En el 2012 y 2018, el FEMA publicó una actualización de la primera generación de diseño por desempeño bajo el nombre de “Nueva Generación de Metodologías de Diseño por Desempeño”. En esta metodología se toman en consideración diversos parámetros de gran importancia al momento de realizar la propuesta estructural de una edificación, como lo son pérdidas económicas, tiempos de reparación, pérdida de vidas, etc. En la actualidad, diversos estudios han sido realizados con esta nueva metodología, algunos proponiendo métodos para su implementación en la práctica [1,2]; otros han evaluado el desempeño sísmico de edificios en diferentes países [3–5]. En México se han realizado estudios aplicando esta metodología tanto para rehabilitación como para estructuras nuevas, con diferentes sistemas estructurales [6,7].

En años recientes, la sociedad a nivel global ha sufrido grandes daños y pérdidas considerables debido a la actividad sísmica, con sismos como el de Kobe, Japón (1995), Loma Prieta, USA (1984), Japón (2011), y México es uno de los países que más se ha visto afectado, esto debido a los sismos del 19 de septiembre de 1985, el cual, según algunas organizaciones reportan que provocó alrededor de 20,000 pérdidas de vidas y daños económicos estimados en 8,000 mdd [8], y años más tarde el sismo del 19 de septiembre de 2017, el cual provocó pérdidas cercanas a los 1,500 mdd. Debido a los grandes daños que históricamente han sufrido los edificios debido a cargas laterales por sismo, lo cual, en algunas ocasiones, debido a la dificultad en su reparación, incurre en grandes costos económicos, ha surgido el interés en desarrollar estructuras que presenten un mejor comportamiento sísmico, incrementando su rigidez y ductilidad de una manera práctica y económica. Recientemente, uno de los sistemas disipadores de energía más estudiados y que está tomando auge son los contravientos restringidos al pandeo (CRP) debido a su gran efectividad al momento de disipar energía sísmica. Generalmente, estos están compuestos de un núcleo de acero y una carcasa (que por lo general es un perfil de acero hueco relleno de mortero), lo que permite un comportamiento histérico sumamente estable. Algunos estudios han evaluado la confiabilidad estructural de edificios con CRP [9], mientras que otros han evaluado el desempeño sísmico de este sistema estructural [10]. A diferencia de los contravientos tradicionales, los CRP presentan un comportamiento más estable ante cargas cíclicas que los contravientos tradicionales, como se muestra en

la Figura 2.

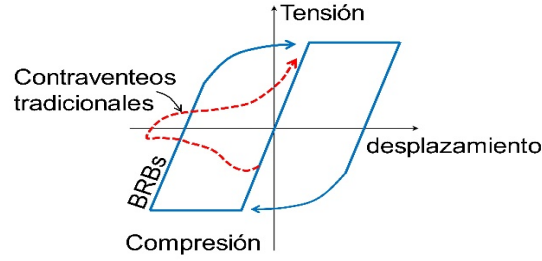


Figura 2: *Comportamiento cíclico de contraviento restringido al pandeo vs. contraviento tradicional.*

En países como Estados Unidos y Japón, los contravientos restringidos al pandeo son sistemas comunes para aumentar la rigidez estructural y disipar energía, debido a su buen desempeño tanto estructural como económico. En México, ha crecido el interés por implementar estos sistemas en estructuras. Este estudio evaluará el desempeño sísmico de edificios ubicados en suelo blando de la Ciudad de México con geometrías similares, pero distintos sistemas estructurales (marcos resistentes a momento y sistemas duales con CRP). La evaluación se enfocará en pérdidas económicas esperadas y costos de ciclo de vida para identificar ventajas y desventajas. Los edificios serán diseñados según las NTCS-2020 [11], seleccionando registros sísmicos representativos para realizar análisis dinámicos no lineales. Los parámetros de demanda estructural (EDP) se procesarán en el software PACT [12], siguiendo la metodología del FEMA P-58 y las pérdidas económicas se convertirán a costos locales mediante un método racional. Finalmente, se calcularán las pérdidas anuales esperadas (EAL) y los costos de ciclo de vida, parámetros clave para decisiones en proyectos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para esta investigación, se utilizó la segunda generación de la metodología PBSD, esta deriva de estudios anteriores [13] y fue desarrollada por el Centro de Investigación sobre Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER). Esta nueva metodología hace uso del teorema de probabilidad total para estimar el desempeño sísmico de una estructura en términos de una tasa media anual de excedencia de ciertos parámetros de desempeño $\lambda(PM)$, como pueden ser costos y tiempos de reparación, pérdida de vidas e impacto ambiental. La Ec. (1) describe este procedimiento:

$$(PM) = \iiint G(PM | DS) dG(DS | EDP) dG(EDP | IM) d\lambda(IM) \quad (1)$$

donde $\lambda(PM)$ representa un parámetro de desempeño, en este caso será el costo por reparación asociado a la ocurrencia de un determinado estado de daño (DS), EDP es un parámetro de demanda estructural, como pueden ser distorsiones de entrepiso, aceleraciones de piso o velocidades de piso, asociadas a un determinado nivel de intensidad sísmica (IM), para representar este parámetro se pueden utilizar diversas

medidas de intensidad, como por ejemplo; aceleración espectral en el periodo fundamental de la estructura $S_a(T_1)$ [14], aceleración espectral promedio $S_{a,avg}$, entre otras, para este caso, la medida de intensidad sísmica utilizada fue $S_a(T_1)$. La metodología de esta generación de PBSD se puede resumir en cuatro funciones para determinar el desempeño sísmico de cualquier estructura; G (PMIDS) representa una función de consecuencia, la cual en este caso expresa los costos de reparación para un determinado estado de daño, G (DSIEDP) es una función de fragilidad estructural la cual define un estado de daño del edificio para un parámetro de demanda estructural determinado, G (EDPIIM) representa una distribución de las demandas estructurales para un determinado nivel de intensidad sísmica, por último, (IM) representa la curva de peligro sísmico para la medidas de intensidad utilizadas asociadas al sitio donde se encuentra localizada la estructura. En la Figura 3 se muestra el esquema de las etapas necesarias para estimar el desempeño sísmico.

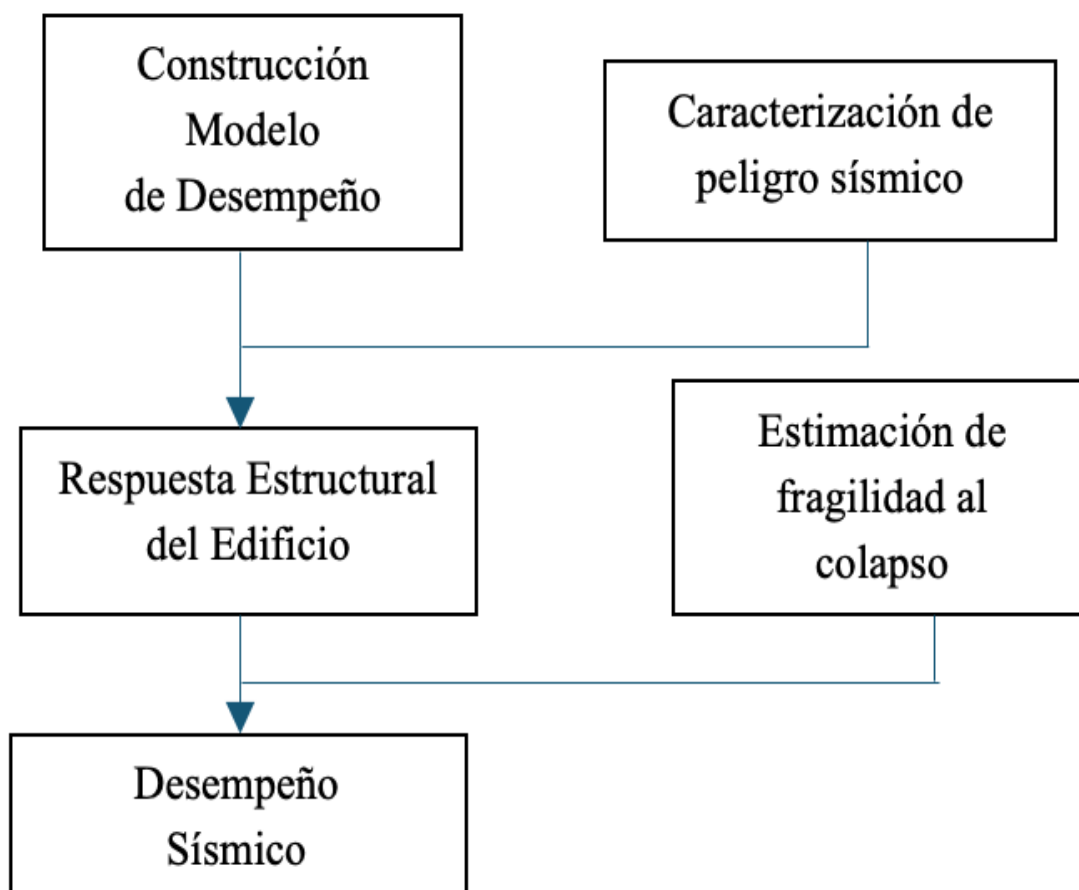


Figura 3: Diagrama para la evaluación de desempeño sísmico de acuerdo a la metodología del FEMA P-58.

La etapa inicial del proceso es la construcción de un modelo de desempeño sísmico en el software PACT, para esto se deben incluir todas las características del edificio, como tipo de ocupación, geometría,

costo inicial de construcción, costo de reemplazo, el umbral de pérdidas total (TLT), componentes tanto estructurales como no estructurales del edificio, entre otros. El FEMA P-58 provee algunas herramientas electrónicas que facilitan la determinación de componentes de la estructura. El análisis del peligro sísmico requiere seleccionar registros sísmicos representativos del sitio, los cuales se escalan para realizar análisis dinámicos incrementales (IDA) congruentes con el espectro objetivo de la zona. El FEMA P-58, mediante su herramienta PACT, permite evaluar el desempeño sísmico basado en intensidad, escenario o tiempo, siendo este último útil para análisis costo-beneficio. En este estudio, se utilizaron análisis basados en intensidad y tiempo, empleando registros sísmicos recomendados por el FEMA P-58. La respuesta estructural se obtuvo mediante análisis no lineales, considerando niveles de intensidad hasta el colapso. Para manejar incertidumbres, se utilizó el método Monte Carlo, que permite estimar daños y pérdidas económicas asociadas mediante curvas de fragilidad, relacionando daños con costos de restauración. Los resultados se discutirán en detalle en secciones posteriores.

Características generales de los modelos

Se diseñaron dos edificios de concreto reforzado (CR), el primero a base de un sistema estructural tradicional de marcos resistentes a momento (MRM) y, el segundo, equipado con contravientos restringidos al pandeo (CRP). Ambos modelos tienen una geometría de 10 niveles con una altura de entrepiso de 3.5 m, 3 crujeías en dirección “X” y 4 crujeías en dirección “Y” con claros de 7 metros en ambas direcciones. Los dos edificios fueron diseñados considerando un factor de comportamiento sísmico $Q=4$ y para una ocupación de tipo habitacional. En la Figura 4 se muestra la geometría en planta y elevación de los modelos estudiados.

Las distorsiones máximas de entrepiso para prevención de colapso indicadas en las NTCS-2020 son de 0.03 y 0.02, para sistemas estructurales a base de MRM y sistemas duales (SD) con CRP, respectivamente. Las características principales de los edificios se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características principales de los edificios.

Modelo	Tipo de suelo	Abreviatura	T_1	Intensidad Diseño (g)	Distorsión límite NTCS-2020	Peso (ton)
Modelo 1	Blando	M-MRSS	1.61	1.2	0.03	4261.5
Modelo 2	Blando	M-SDSS	1.09	0.71	0.02	3524.7

Diseño estructural de los edificios

Los edificios fueron diseñados siguiendo los lineamientos de las NTCS-2020. Para realizar esto se utilizó el software ETABS[15]. A continuación, se muestra el perfil de distorsiones del edificio M-MRSS. En este tipo de sistema estructural, para una ductilidad de $Q=4$, se establece una distorsión máxima permisible de 0.03. Para el modelo equipado con CRP se realizó un diseño similar al anterior, en lo que respecta a que se debe de cumplir con un cierto umbral de distorsiones permisibles, el cual para un sistema equipado con contravientos restringidos al pandeo es de 0.02. Para poder realizar un diseño respecto

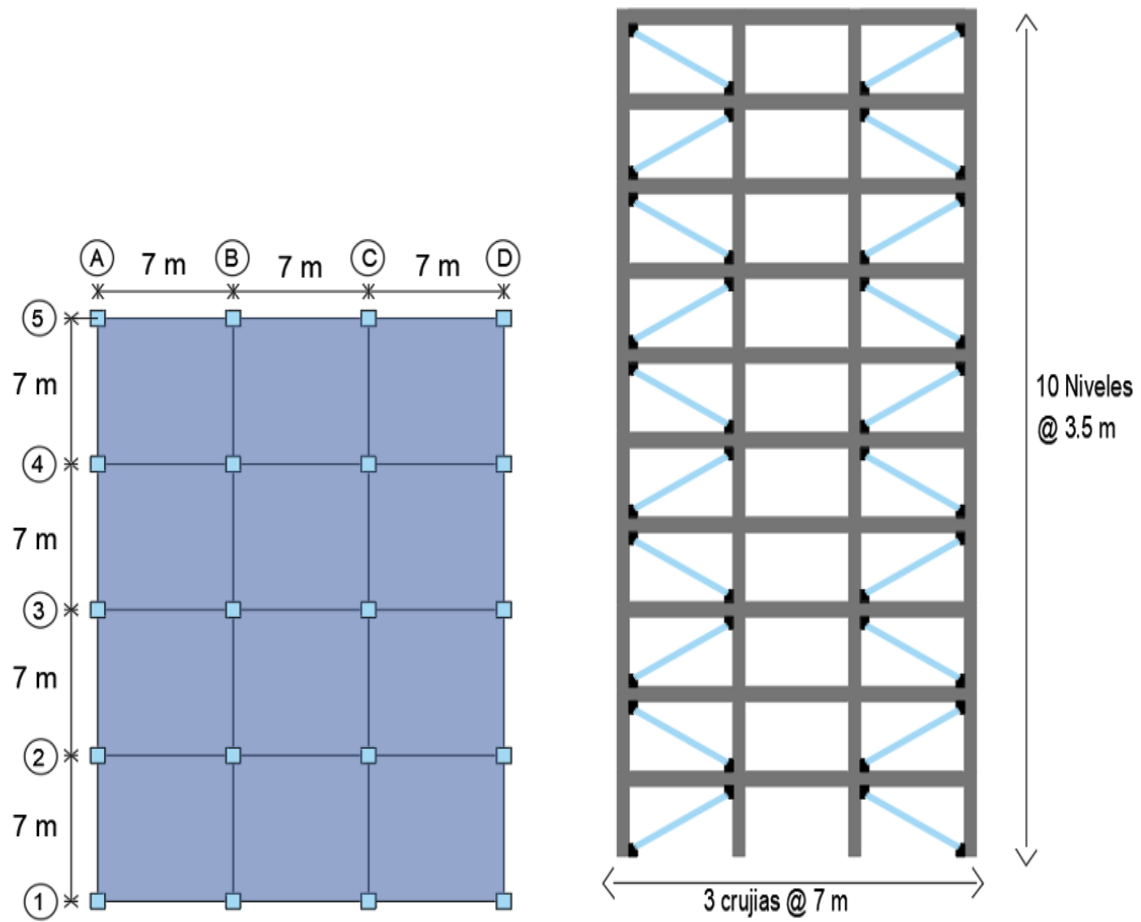


Figura 4: Vista en planta y elevación de los edificios.

a la normativa de las NTCS-2020, en su sección 4.2.1, se menciona que el sistema primario (columnas y vigas) debe de soportar por lo menos un 30 % del cortante de entrepiso que el sismo provoque en la estructura, mientras que el sistema secundario, en este caso los contravientos restringidos al pandeo, deben de ser capaces de resistir el porcentaje de cortante restante. En la Figura 5 se observan los perfiles de distorsiones de los modelos, en el cual los dos cumplen con las distorsiones establecidas en la normativa. En la Tabla 2 se presentan las dimensiones de los elementos estructurales de los modelos.

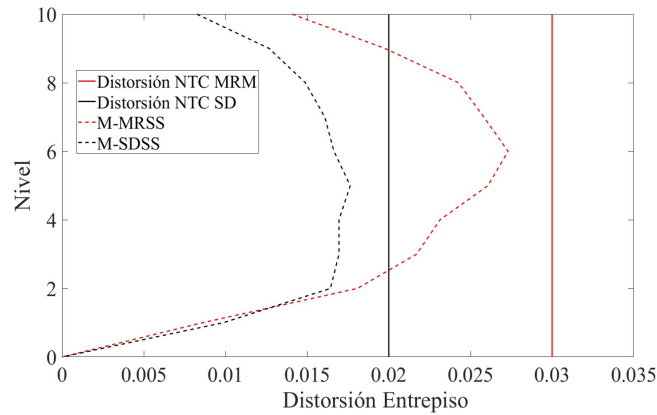


Figura 5: Perfil de distorsiones de los modelos diseñados.

Tabla 2: Dimensiones de las secciones estructurales, $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

Modelo	Niveles	Vigas		Columnas		CRP Área
		Sección (cm)	Área acero	Sección (cm)	Área acero	Núcleo (cm ²)
1	1–4	70 x 40	9 var $\Phi 6$	90 x 90	18 var $\Phi 8$	–
	5–7	60 x 35	8 var $\Phi 6$	80 x 80	14 var $\Phi 8$	–
	8–10	55 x 30	6 var $\Phi 6$	70 x 70	12 var $\Phi 8$	–
2	1–4	50 x 25	5 var $\Phi 6$	70 x 70	10 var $\Phi 8$	28.45
	5–7	45 x 25	5 var $\Phi 6$	65 x 65	10 var $\Phi 8$	22.75
	8–10	40 x 25	5 var $\Phi 6$	60 x 60	8 var $\Phi 8$	17.06

Para la distribución de los CRP se definió un arreglo lo más simétrico posible, esto para evitar problemas de torsión que se pudieran presentar en la estructura. Para los primeros 4 niveles se utilizaron CRP con una fuerza de diseño (F_d) de 100 ton, en los niveles 5 y 6 de 80 ton, en los niveles 7 y 8 de 60 ton y en los últimos dos niveles de 40 ton, esta distribución se utilizó para ambos sentidos “X” y “Y”. Estas fuerzas de diseño de los contravientos están directamente asociadas al cortante de entrepiso restante (máximo 70 %) que requiere el sistema primario para cumplir con las distorsiones de entrepiso máximas. Una de las principales ventajas que tienen este tipo de disipadores de energía es que se les considera

como elementos sacrificables, es decir, se busca que estos sean los primeros elementos en fallar en el sistema estructural, cumpliendo así con el método de falla de columna fuerte -viga débil– contraviento aún más débil, esto debido principalmente a la practicidad de ser reemplazados en poco tiempo cuando sufren daños significativos.

Caracterización del peligro sísmico

Para determinar el desempeño sísmico basado en el tiempo, se realizan análisis dinámicos no lineales utilizando registros sísmicos representativos del sitio. Según el FEMA P-58, la medida de intensidad sísmica utilizada es la pseudoaceleración $S_a(T_1)$. Este estándar recomienda al menos 7 pares de registros, mientras que las NTCS-2020 sugieren 12 pares para suelos con periodos mayores a 1 s. En esta investigación, se emplearon 20 pares con espectros similares al espectro objetivo (EPU), obtenido del programa SASID de acuerdo con las NTCS-2020, considerando un rango de periodos de $0.2 T_1$ a $2 T_1$ para incluir la pérdida de rigidez y modos superiores. Los registros se obtuvieron de la base de datos de CIRES y del Instituto de Ingeniería UNAM, y están asociados a eventos de subducción, con magnitudes de momento (M_w) mayores de 6 y distancias epicentrales cercanas a 300km a la estructura. Los registros seleccionados fueron escalados para diferentes intensidades utilizando la pseudoaceleración $S_a(T)$ como referencia y la Ec. (2) [11]:

$$S_a(T) = \sqrt{S_{aEW}(T) \times S_{aNS}(T)} \quad (2)$$

Donde $S_{aEW}(T)$ y $S_{aNS}(T)$ representan las pseudo-aceleraciones para un determinado periodo en la componente EW y NS respectivamente. En la Figura 6 se muestran los registros sísmicos seleccionados para el modelo M-MRSS, así como también se muestran el 16th, 50th y 84th percentil. Se puede apreciar la coincidencia en pseudo-aceleración de los espectros de respuesta seleccionados con el EPU en el T_1 (1.61 s), a su vez, estos cuentan con formas espectrales similares. De la misma manera se seleccionaron los registros sísmicos del modelo M-SDSS.

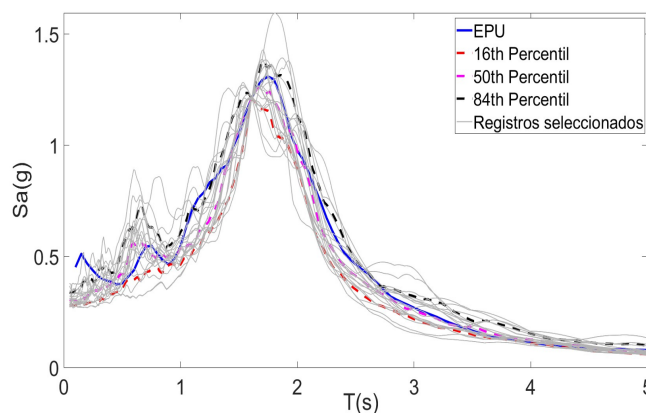


Figura 6: Registros sísmicos seleccionados para el modelo M-MRSS ($T_1 = 1.61$ seg).

Modelación no lineal

Para evaluar el desempeño sísmico de una estructura, primero se obtienen sus respuestas estructurales mediante análisis dinámicos incrementales no lineales (IDA) [16] realizados en OpenSees [17]. Se utilizó un amortiguamiento de Rayleigh del 5 %, el método de solución de Newmark y elementos tipo fibra basados en formulaciones fuerza-deformación. Para los elementos de concreto (columnas y vigas) utilizó el material `concrete 02z` para el acero de refuerzo se utilizó el material “steel 02”, así como también el modelo de Mander para representar el comportamiento no lineal del concreto. Las secciones transversales (columnas y vigas) se modelaron con elementos `forceBeamColumn` usando 5 puntos de integración Gauss-Lobatto, mientras que el número de fibras se definió según estudios existentes en la literatura para equilibrar precisión y eficiencia computacional. Para representar el acero de los CRP se usó “steel MPF” por su representación precisa del comportamiento no lineal de estos elementos. Para representar de una manera adecuada el comportamiento de los CRP, se utilizaron elementos `forceBeamColumn` tanto en las conexiones como para el núcleo del CRP. Para el acero del núcleo se utilizó el material “steel MPF”, ya que este nos permite definir la resistencia del material tanto a tensión como a compresión, la cual en este caso será la misma, ya que de esta manera se considera el aporte del confinamiento de la carcasa rellena con mortero, la cual es evitar que la sección transversal del núcleo del CRP presente pandeo local a compresión antes de alcanzar su resistencia de fluencia. Los CRP se dividieron en tres partes a lo largo de su eje, asignando un área de acero mayor en las conexiones elásticas (relación 4:1) para garantizar su correcto comportamiento, como se muestra en la Figura 7.

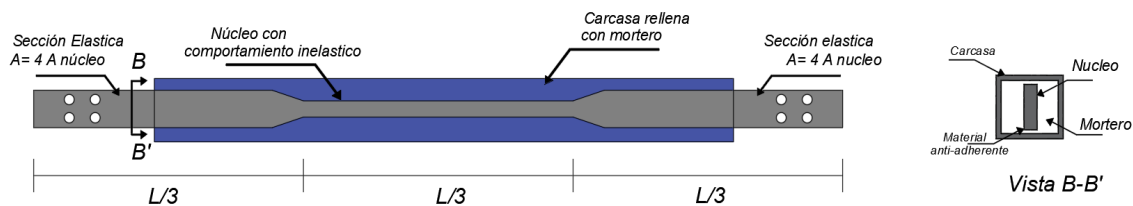


Figura 7: Esquema del modelado del CRP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros de demanda estructural

Se realizaron análisis dinámicos no lineales en OpenSees con 20 pares de registros sísmicos a diferentes niveles de intensidad para cada modelo. Los resultados se expresaron como demandas estructurales (EDP): distorsiones entrepiso, distorsiones residuales y aceleraciones de piso, necesarias para el software PACT. Esto permite estimar el daño en componentes estructurales y no estructurales, así como las pérdidas económicas asociadas. La Figura 8 muestra las distorsiones de entrepiso obtenidas, destacando con un círculo rojo el punto de colapso estructural.

Las Figuras 8a y 8b muestran las distorsiones de entrepiso para diferentes niveles de intensidad sísmica. Para intensidades bajas ($S_a < 0.3$ g), el modelo M-SDSS tiene mejor desempeño que el modelo M-MRSS, ya que los CRP aún operan dentro de su capacidad de diseño. A intensidades superiores a 0.3

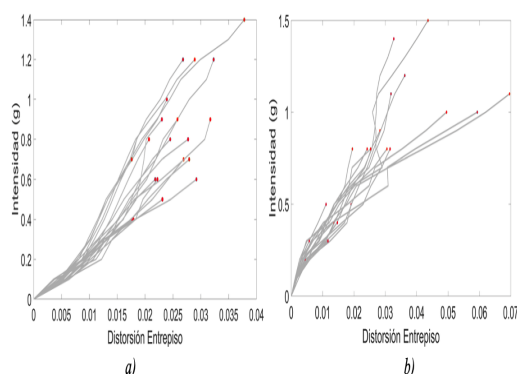


Figura 8: IDA's de distorsiones de entrepiso a) M-MRSS, b) M-SDSS.

g, los CRP entran en fluencia, aumentando las distorsiones, y a más de 0.6 g fallan, dejando al sistema de marcos soportar las cargas. El modelo M-SDSS muestra distorsiones más pronunciadas tras el fallo de los contravientos, debido a sus elementos estructurales más pequeños. La Figura 9 muestra que las aceleraciones de piso (PFA) alcanzan máximos en los niveles superiores, especialmente en la azotea. El modelo M-SDSS presenta aceleraciones ligeramente mayores que el M-MRSS debido a su menor periodo fundamental, que lo acerca más a la zona espectral sensible a aceleraciones. Es importante mencionar que para esta investigación las distorsiones residuales no se discuten explícitamente por razones de extensión del documento, sin embargo, fueron calculadas para todos los casos y se incorporaron a los correspondientes modelos de desempeño de cada modelo, pues son un parámetro de relevancia al momento de estimar las pérdidas económicas esperadas.

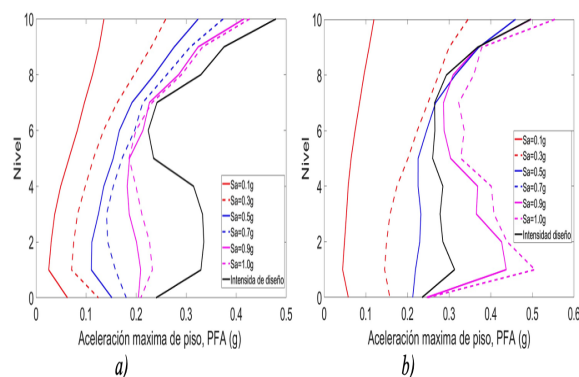


Figura 9: Distribución en altura de las aceleraciones de piso a) M-MRSS, b) M-SDSS.

Las Figuras 10 y 11 confirman la efectividad de los CRP, cuyos ciclos histeréticos muestran buena estabilidad bajo tensión y compresión.

Fragilidad al colapso

El colapso estructural está relacionado con la pérdida de resistencia vertical de una estructura, lo cual

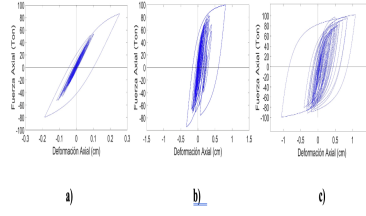


Figura 10: *Comportamiento histerético de un CRP $F_d = 100$ ton para intensidades a) 0.3 g, b) 0.5 g, c) 0.9 g.*

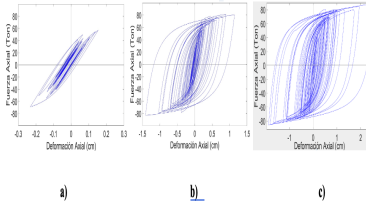


Figura 11: *Comportamiento histerético de un CRP $F_d = 80$ ton para intensidades d) 0.3 g, e) 0.5 g, f) 0.9 g.*

por lo general ocurre cuando se presentan distorsiones de entrepiso excesivas o se genera una inestabilidad debido a la pérdida de rigidez lateral. Para determinar el colapso estructural existen diversos criterios, como: a) cuando se alcanza un cierto nivel de intensidad sísmica, b) cuando la estructura alcanza un cierto umbral de distorsión de entrepiso, c) cuando la pendiente post-fluencia es menor en cierto porcentaje en comparación a la pendiente elástica, d) cuando el análisis falla en la convergencia hacia un resultado. Para este estudio se utilizó este último criterio de falla. Pueden presentarse diversos tipos de colapso, ya sea colapso parcial o total, y esto tiene grandes implicaciones tanto en pérdida de vidas como en pérdidas económicas. La fragilidad al colapso se puede definir como la probabilidad de que una estructura colapse debido a un determinado nivel de intensidad sísmica, y esta por lo general se expresa por medio de la mediana de intensidad y su correspondiente dispersión (σ) asociadas al colapso, las cuales son parámetros que resultan del ajuste a una distribución del tipo log-normal.

Para poder obtener la curva de fragilidad al colapso, se llevaron a cabo una gran cantidad de análisis dinámicos incrementales (IDA). La probabilidad de colapso se obtuvo mediante la Ec. (3), para diversos niveles de intensidad sísmica, S_a .

$$P(C | S_a) = \frac{nc}{N} \quad (3)$$

Donde $P(C | S_a)$ representa la probabilidad de colapso para un determinado nivel de intensidad, nc es el número de análisis para el cual ocurrió colapso para una intensidad S_a , y N es el número de análisis realizados para la misma intensidad sísmica. En la Figura 12, se pueden observar las curvas de fragilidad al colapso obtenidas para los modelos estudiados utilizando una herramienta que proporciona el FEMA P-58. Estas curvas reflejan que, conforme el nivel de intensidad sísmica aumenta, la probabilidad de que la estructura colapse también incrementa, por ejemplo, para una intensidad (S_a) de 0.5g el modelo

M-MRSS tiene una probabilidad de colapso de alrededor de 5 % y para el modelo M-SDSS es de 20 %, mientras que para una intensidad de 1.5g son cercanas a 95 % y 80 % respectivamente. Este tipo de curvas son útiles para relacionar diferentes niveles de intensidad de interés con la probabilidad condicional de colapso de cada estructura. Además, dicha probabilidad es necesaria para la estimación de las pérdidas económicas esperadas de acuerdo con la metodología del FEMA P-58.

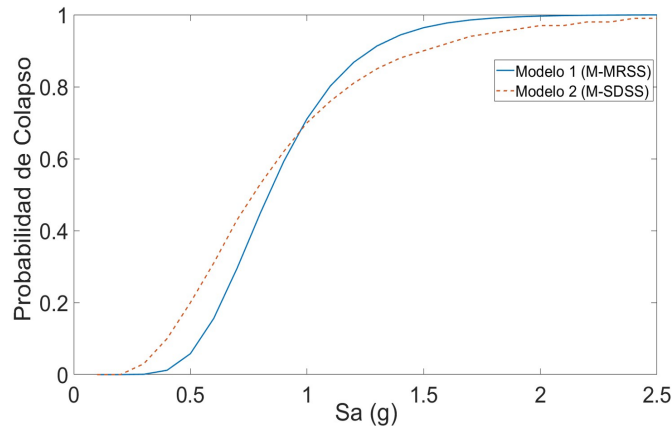


Figura 12: Curvas de fragilidad al colapso de los modelos.

Peligro sísmico

En este estudio se realizaron análisis de desempeño sísmico basado en el tiempo, en el cual se consideran todos los niveles de intensidad sísmica que pudieran presentarse durante la vida útil de la estructura, para esto se realiza un proceso de integración de las pérdidas económicas esperadas para cada nivel de intensidad relacionadas con una curva de peligro sísmico. La Figura 13 presenta las curvas de peligro utilizadas para suelo blando de la Ciudad de México. Una curva de peligro sísmico es característica de una localización y de un determinado tipo de suelo, esto relaciona un valor de pseudo-aceleración (S_a) con una probabilidad anual media de excedencia (MAF), por ejemplo, para una $S_a = 0.2g$, la MAF es de 0.137 para el modelo M-MRSS. Las curvas de peligro sísmico se obtienen aplicando un análisis de peligro sísmico probabilístico (PSHA, por sus siglas en inglés), del cual se pueden conocer más detalles en Baker et al. [18].

Desempeño sísmico

El software PACT estima las pérdidas por reparación utilizando resultados estructurales de los IDA y curvas de fragilidad para componentes estructurales y no estructurales, indicando costos y tiempos de reparación según el daño. Con el método Montecarlo, genera múltiples realizaciones para diferentes intensidades sísmicas, asociando cada una a un nivel de desempeño. Este estudio analiza las pérdidas por reparación, excluyendo costos por daños humanos o pérdida de vidas. Para calcular los costos anuales de reparación, se realizó un análisis basado en el tiempo, integrando pérdidas esperadas por intensidad sísmica con la curva de peligro del sitio. Los costos iniciales de construcción (Co) se obtuvieron del Construction Market Survey 2022 [19], y el costo de reemplazo (CR) se estimó como 1.2 Co , conside-

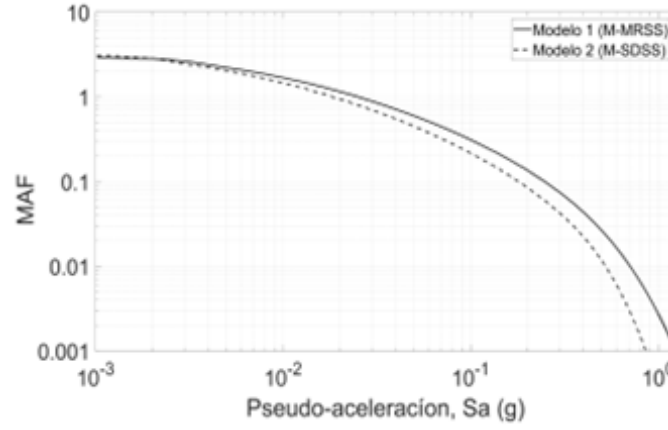


Figura 13: Curvas de peligro sísmico suelo blando para la Ciudad de México.

rando demolición y escombros. Los costos del PACT se ajustaron para Ciudad de México mediante una conversión racional [20] usando la ecuación Ec. (4).

$$\text{Costo de Reparación} = C_{\text{repair,USA}} \cdot [(1 - f_{\text{lab}}) \cdot r_{\text{mat}} + f_{\text{lab}} \cdot r_{\text{lab}}] \quad (4)$$

donde $C_{\text{repair,USA}}$ representa los costos de reparación que utiliza el pact en USA; f_{lab} representa el factor de porcentaje del costo de mano de obra en relación al costo total de reparación, el cual varía dependiendo el estado de daño del componente. Los valores del factor f_{lab} se tomaron de Porter et al., [21]. Los factores r_{lab} y r_{mat} , representan la relación de costos de materiales y mano de obra entre USA y la región deseada. Una vez se tienen estos valores, se obtiene un factor de conversión de costos (RCR) y se aplica al costo por defecto utilizado por el PACT. Este procedimiento se utilizó para todos los componentes de los modelos analizados.

El costo inicial de construcción del M-MRSS fue de \$7,878,024 USD, mientras que el del modelo M-SDSS equipado con CRP fue de \$9,116,596 USD. Como se mencionó anteriormente, para los modelos estudiados se realizó un análisis basado en el tiempo, el cual permite generar curvas de pérdidas, que facilita evaluar la probabilidad anual de excedencia de diversos niveles de desempeño (costos por reparación). En la Ec. (5) se muestra la forma en la cual se obtienen estas curvas, la cual es combinando la curva de peligro sísmico con la probabilidad de que un determinado costo de reparación (CR) exceda un cierto valor (cr) para un cierto nivel de intensidad (IM). La contribución de la curva de peligro sísmico se representa mediante el término $P(CR > cr | IM = im)$, que es la tasa media anual de excedencia () para una intensidad sísmica (IM).

$$P(CR > cr) = \int_{\lambda} P(CR > cr | IM = im) d\lambda(im) \quad (5)$$

Se realizaron diversos análisis para diferentes niveles de intensidad sísmica, desde 0.1g hasta 1.5g con incrementos de 0.1g. En la Figura 14, se muestran las funciones de distribución acumulada de costos de reparación para niveles de intensidad de $S_a=0.1g$ y $0.3g$, en donde se puede observar que el modelo M-SDSS presenta costos por reparación menores que el modelo M-MRSS. En la Figura 15, se presentan las

funciones de distribución acumulada de no excedencia de los modelos analizados para diferentes niveles de intensidad sísmica, incluida la intensidad de diseño (Tabla 1). El umbral de pérdida total (TLT) se consideró del 70 %, el cual indica que si el costo por reparación excede el 70 % del costo de reemplazo, es más factible demoler el edificio y volverlo a construir (costo de reparación/ TRC $0.70 =$ costo de reemplazo). Para los niveles de intensidad sísmica de diseño, se puede observar que es muy probable que el edificio sufra grandes daños que superen este umbral de costos, ya que presentan probabilidades de no excedencia del 35 % aproximadamente, es decir, si ocurre un sismo de la magnitud para la que fue diseñado, existe una probabilidad del 65 % de que el edificio sufra pérdida total. Es importante mencionar que, aunque la probabilidad de que el edificio alcance el nivel TLT sea muy pequeña o cercana a 0, esto no significa que el edificio no sufrirá daño, solo que el daño que sufra será factible repararlo. Estas gráficas son útiles para ver el comportamiento de las estructuras en términos de porcentajes de probabilidad y costos de reparación, estas sirven para calcular pérdidas esperadas, que para obtenerse, es necesario combinar las funciones de distribución acumuladas con el MAF de la curva de peligro sísmico para todos los niveles de intensidad. En las secciones siguientes se discutirá sobre pérdidas esperadas y costos de ciclo de vida.

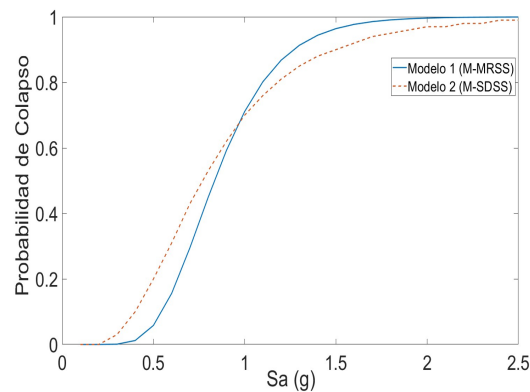


Figura 14: *Funciones de distribución acumulada de costos de reparación. a) $S_a = 0.10$ g b) $S_a = 0.30$ g*

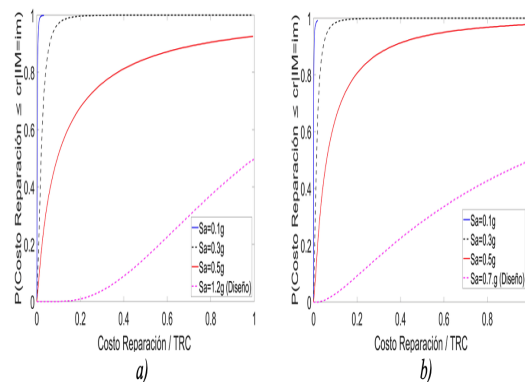


Figura 15: *Funciones de distribución acumulada de costos de reparación, a) M-MRSS, b) M-SDSS.*

Pérdidas anuales esperadas

Las curvas de distribución acumulada de pérdidas ofrecen una referencia inicial sobre el comportamiento de un edificio, pero no son útiles para decisiones concretas, ya que no presentan parámetros clave como pérdidas económicas, tiempos de reparación o riesgos de vidas. La Figura 16 presenta resultados significativos, como las pérdidas anuales esperadas (EAL), que reflejan los costos anuales por reparaciones necesarias tras daños sísmicos. Este parámetro, junto con el costo de ciclo de vida, es crucial para decisiones costo-beneficio. Las EAL se calculan integrando las curvas de pérdidas con la curva de peligro sísmico. El modelo M-MRSS tiene EAL de 1.82 %, mientras que el M-SDSS registra 1.06 %, ambas respecto al TRC.

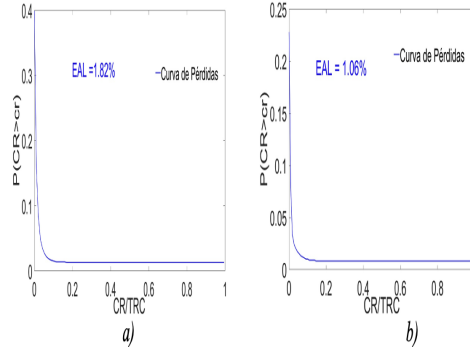


Figura 16: *Pérdidas anuales esperadas, a) M-MRSS, b) M-SDSS.*

Análisis de costo de ciclo de vida

Las pérdidas anuales esperadas son útiles para evaluar inicialmente el desempeño de un edificio, pero el análisis costo-beneficio es el parámetro clave para la toma de decisiones. Este análisis identifica la opción de diseño más económica a lo largo de un periodo (25, 50, 100 años) al considerar los costos iniciales de construcción y las pérdidas anuales por daños. El costo del ciclo de vida se estima calculando el valor presente (VPN) de las pérdidas anuales, según la Ec (6).

$$VPN = P_t \left[\left(1 - \frac{1}{(1 + i_n)^t} \right) / i_n \right] \quad (6)$$

donde t es el periodo de tiempo, para este caso se consideró una vida útil de 50 años, i_n es una tasa de interés que se consideró del 11 % y P_t son las pérdidas anuales totales, que incluyen las pérdidas por reparación (EAL) y los costos debido al tiempo que el edificio estará inactivo debido a reparaciones. Es importante mencionar que no se consideró el tiempo previo que toma el iniciar las reparaciones, como puede ser la inspección post-sísmica, rehabilitación estructural, obtención de recursos financieros, entre otros [22], los cuales pueden llegar a ser de gran relevancia, aumentando el tiempo total de reparación. Se consideró que cada día de inactividad tendrá un costo de $0.01 C_o$. Por ejemplo, el modelo M-MRSS presenta $EAL = 1.82 \%$ ($1.2 C_o * 0.0182$) y un tiempo de inactividad por reparaciones de 16.72 días al año, por lo tanto, $VPN = (0.1823 * 1.2 C_o + (16.72 * 0.01 C_o)) [(1 - 1/(1 + 0.11)^{50}) / 0.11]$, lo que da como resultado $1.10 C_o$, es decir, en un periodo de 50 años se tendrá que invertir 1.1 veces el costo inicial de construcción

en trabajos de reparación del edificio para regresarlo a su estado original. En la Figura 17, se observan los tiempos por reparación y costos totales esperados durante el ciclo de vida de cada uno de los modelos. Para términos de discusión y comparación de resultados, los costos esperados de todos los modelos fueron normalizados con respecto al C_0 del modelo M-MRSS. De los resultados obtenidos se puede observar que el modelo M-SDSS resulta ser la opción de diseño mas beneficiosa, ya que aunque su costo inicial de construcción sea mayor que el del modelo M-MRSS, al transcurrir un periodo de 50 años resultará económicamente más efectivo.

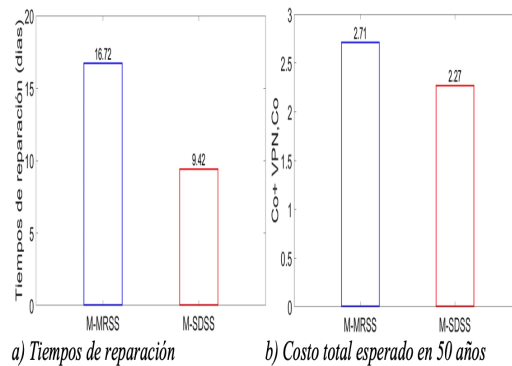


Figura 17: *Tiempo de reparación y costo de ciclo de vida de los modelos.*

CONCLUSIONES

Se diseñaron dos edificios de 10 niveles con diferentes sistemas estructurales: uno con marcos de concreto reforzado resistentes a momento y otro con un sistema dual (marcos de concreto y contravientos restringidos al pandeo), según las NTCS-2020, ubicados en suelo blando de la Ciudad de México. Sus características lineales y no lineales se modelaron en OpenSees, realizándose análisis dinámicos no lineales con 20 pares de registros sísmicos. Finalmente, se evaluó el desempeño sísmico de ambos edificios en términos de pérdidas económicas esperadas, empleando las metodologías de diseño sísmico basado en desempeño del FEMA P-58. Los principales resultados de esta investigación fueron:

- Con respecto a los costos iniciales de construcción, el modelo M-MRSS es más barato que el modelo M-SDSS, sin embargo, al tomar en cuenta el costo en ciclo de vida de los edificios, el modelo M-SDSS resulta casi un 20 % más económico durante el periodo de vida útil de 50 años.
- El modelo M-MRSS presenta casi el doble de tiempos de reparación que el modelo equipado con CRP, esto debido a que los principales daños los absorben los CRP los cuales son muy prácticos a la hora de reparar o reemplazar, esto disminuye considerablemente los costos esperados durante la vida útil de la estructura.
- El uso de CRP contribuye a disminuir considerablemente las pérdidas anuales esperadas y disminuye los costos durante el ciclo de vida de la estructura.

- El modelo M-SDSS con CRP resultó ser una opción de diseño considerablemente superior al modelo M-MRSS, tanto en comportamiento estructural (disminuye secciones transversales y distorsiones entrepiso) y exhibe una mayor relación costo-beneficio.
- La metodología utilizada en este trabajo presenta resultados útiles para las personas encargadas de tomar decisiones, ya que permite evaluar el desempeño sísmico de las estructuras en términos de pérdidas económicas debido a costos de reparación, y relación costo-beneficio durante la vida útil del edificio. A su vez, los dispositivos de control de respuesta, en este caso los CRP son una buena opción, ya que, como se mostró en este trabajo, mejoran tanto la respuesta estructural del edificio como el aspecto económico durante la vida útil de la edificación.

Este estudio se centró en evaluar las pérdidas económicas de edificios de concreto reforzado en suelo blando. Futuros trabajos podrían analizar el desempeño sísmico de otros sistemas estructurales, como edificios de acero, en diversas ubicaciones y suelos, así como evaluar diferentes configuraciones de contravientos. También sería valioso incluir parámetros como pérdidas de vidas e impacto ambiental, de creciente relevancia.

AGRADECIMIENTOS

El primer, tercer y quinto autor agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) la beca otorgada para sus estudios de posgrado. Se agradece el apoyo otorgado por la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PRO_A8_015 del programa PROFAPI 2022.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Alfredo Félix Soto: Software, Metodología, Redacción-borrador original, Visualización. **Alfredo Reyes Salazar:** Administración del proyecto, supervisión. **Oliver Santos Amador:** Investigación, Software. **Mario D. Llanes Tizoc:** Software, Validación. **Juan D. Trasviña Soberanes:** Investigación, Curación de datos. **Federico Valenzuela-Beltrán:** Conceptualización, Redacción- revisión y edición, supervisión.

REFERENCIAS

- [1] G. Perrone, D. Cardone, G.J. O'Reilly, and T.J. Sullivan. Developing a direct approach for estimating expected annual losses of Italian buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019; 00:1–32. doi: 10.1080/13632469.2019.1657988.
- [2] G. Cremen and J.W. Baker. Quantifying the benefits of building instruments to FEMA P-58 rapid post-earthquake damage and loss predictions. *Engineering Structures*, 2018; 176:243–253. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.017.
- [3] C. Caruso, R. Bento, and J.M. Castro. A contribution to the seismic performance and loss assessment of old RC wall-frame buildings. *Engineering Structures*, 2019; 197:109369. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109369.

-
- [4] S.H. Hwang, J.S. Jeon, and K. Lee. Evaluation of economic losses and collapse safety of steel moment frame buildings designed for risk categories II and IV. *Engineering Structures*, 2019; 201:109830. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109830.
- [5] N. Giordano, K.M. Mosalam, and S. Günay. Probabilistic performance-based seismic assessment of an existing masonry building. *Earthquake Spectra*, 2020; 36:271–298. doi: 10.1177/8755293019878191.
- [6] F. Valenzuela-Beltrán, J. Ramón Gaxiola-Camacho, M.D. Llanes-Tizoc, V. Baca, J.M. Leal-Graciano, and A. Reyes-Salazar. Seismic loss assessment of code-compliant moment-resisting RC buildings located on different soil conditions of Mexico City. *Engineering Structures*, 2024; 300:117195. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.117195.
- [7] C. González, M. Niño, and M.A. Jaimes. Event-based assessment of seismic resilience in Mexican school buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020; 18:6313–6336. doi: 10.1007/s10518-020-00938-5.
- [8] M.A. Santos-Santiago and S.E. Ruiz. Optimal design of buildings under wind and earthquake, considering cumulative damage. *Journal of Building Engineering*, 2022. doi: 10.1016/j.jobe.2022.104760.
- [9] V. Vaca, J. Bojórquez, E. Bojórquez, H. Leyva, and A. Reyes-Salazar. Enhanced seismic structural reliability on reinforced concrete buildings by using buckling restrained braces. *Hindawi*, 2021. doi: 10.1155/2021/8816552.
- [10] J. Puttatt and [Jayarajan]. Seismic evaluation of concentric braced frames using nonlinear static and dynamic time history analysis. *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)*, 2019; 4.
- [11] Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México 2017. *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero*, 2017.
- [12] Federal Emergency Management Agency (FEMA). *Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 3 – Supporting Electronic Materials and Background Documentation*, FEMA P-58; 2018.
- [13] J. Moehle and G. Deierlein. A framework methodology for performance-based earthquake engineering. In: *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- [14] N. Shome. *Probabilistic Seismic Demand Analysis of Nonlinear Structures*. Stanford University, 1999.
- [15] CSI Spain. *ETABS*. n.d.
- [16] D. Vamvatsikos and C. Allin Cornell. Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002. doi: 10.1002/eqe.141.

-
- [17] F. Mckenna, G. Fenves, and M. Scott. *Open System for Earthquake Engineering Simulation*, 2000.
 - [18] J.W. Baker, B.A. Bradley, and P.J. Stafford. *Seismic Hazard and Risk Analysis*. First Edition, Cambridge University Press, 2021.
 - [19] Turner & Townsend. *International Construction Market Survey 2022*, 2022.
 - [20] A. Silva, J.M. Castro, and R. Monteiro. A rational approach to the conversion of FEMA P-58 seismic repair costs to Europe. *Earthquake Spectra*, 2020; 36:1607–1618. doi: 10.1177/8755293019899964.
 - [21] K. Porter, D. Farokhnia, D. Vamvatsikos, and I. Cho. *Guidelines for Component-Based Analytical Vulnerability Assessment of Buildings and Nonstructural Elements*, 2015.
 - [22] J.J. Gutiérrez and A.G. Ayala Milián. Análisis de la resiliencia sísmica de edificios. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 2022:47–73. doi: 10.18867/ris.107.603.

Diseño y Validación de una Estación Meteorológica Autónoma de Bajo Costo para el Sector Cañero

Design and Validation of a Low-Cost Autonomous Weather Station for the Sugarcane Sector

Cárdenas-Magaña, J.A.^{1*} 
(*jorge.cardenas@tamazula.tecmm.edu.mx)

Recibido: 17-04-2025 Aceptado: 04-06-2025

RESUMEN

Esta investigación presenta el diseño, desarrollo y validación de una estación de monitoreo ambiental autónoma orientada al sector cañero, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la toma de decisiones agrícolas. El sistema integra sensores de temperatura (DS18B20), humedad relativa (DHT11) y precipitación (pluviómetro de balancín con sensor de efecto Hall), gestionados mediante una plataforma Arduino. La estructura fue diseñada en SolidWorks e impresa en 3D con filamento PLA, validada mediante análisis estático para resistir vientos de hasta 25 km/h. La estación opera con un panel solar de 6 W, con un consumo energético diario de 0.07 kWh. Las pruebas de campo demostraron una

precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en temperatura, $\pm 4\%$ HR en humedad y un 97 % de exactitud en la medición de precipitación, con un margen de error del 2.5 % durante lluvias intensas. Los datos se transmiten en tiempo real a una plataforma web para su visualización. El prototipo demostró ser preciso, energéticamente eficiente y de bajo costo, constituyendo una alternativa viable y escalable frente a estaciones meteorológicas comerciales para el monitoreo climático en entornos agrícolas.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, Estación meteorológica de bajo costo, Arduino, Pluviómetro digital, Visualización remota de datos.

ABSTRACT

This research presents the design, development, and validation of an autonomous environmental monitoring station for the sugarcane sector, aimed at improving agricultural decision-making. The system integrates temperature (DS18B20), relative humidity (DHT11), and rainfall sensors (tipping bucket rain gauge with Hall effect sensor), managed through an Arduino-based platform. The structure was designed in SolidWorks and manufactured using 3D-printed PLA components, validated th-

rough an Arduino-based platform. The structure was designed in SolidWorks and manufactured using 3D-printed PLA components, validated th-

¹Tecnológico Nacional de México/Universidad TENAM (Colegio de Formación Educativa TENAM S.C.), estudiante de Doctorado en Ingeniería Aplicada; docente del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula, México.



rough static analysis to withstand wind speeds up to 25 km/h. The station is powered by a 6 W solar panel, with an average daily energy consumption of 0.07 kWh. Field tests demonstrated measurement accuracy of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ for temperature, $\pm 4\%$ RH for humidity, and 97 % precision in rainfall detection, with a 2.5 % error margin during heavy rain events. Data is transmitted in real-time to a web-based visualization platform. The prototype proved to be

accurate, energy-efficient, and cost-effective, offering a scalable and viable alternative to commercial weather stations for climate monitoring in agricultural environments.

Keywords: Environmental monitoring, Low-cost weather station, Arduino, Digital rain gauge, Remote data visualization.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo de variables ambientales es un componente esencial en la agricultura de precisión, ya que permite optimizar actividades como el riego, la fertilización y la cosecha. En cultivos como la caña de azúcar, contar con información climática en tiempo real es esencial para determinar el momento óptimo de corte y planificar operaciones logísticas con mayor eficiencia. En regiones como Tamazula de Gordiano, Jalisco, el monitoreo meteorológico aún se realiza de forma manual, lo que implica retrasos en la toma de decisiones, una alta probabilidad de errores humanos y altos costos asociados al desplazamiento del personal técnico. Esta situación limita el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles y afecta negativamente la productividad agrícola. Ante esta problemática, se identificó la necesidad de una solución tecnológica accesible, confiable y de bajo costo que automatice la recolección y transmisión de datos ambientales, y que además sea energéticamente autónoma para operar en zonas rurales sin infraestructura eléctrica estable. En los últimos años, la integración de sensores ambientales con plataformas abiertas y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) ha demostrado ser una estrategia viable para enfrentar estos desafíos. Diversos estudios respaldan el uso de sensores de bajo costo y microcontroladores como Arduino para la recopilación precisa y continua de variables meteorológicas, con resultados satisfactorios en entornos agrícolas. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar, desarrollar y validar una estación de monitoreo ambiental autónoma, orientada al cultivo de caña de azúcar. El sistema propuesto integra sensores de temperatura, humedad relativa y precipitación, gestionados mediante un microcontrolador Arduino Mega, con visualización remota de datos a través de una plataforma web. Además, se asegura la autonomía energética mediante el uso de un panel solar, y se valida su funcionamiento bajo condiciones reales de campo.

Esta propuesta busca ofrecer una alternativa de bajo costo, adaptable y escalable frente a estaciones meteorológicas comerciales, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones agrícolas con base en datos objetivos y oportunos.

DESARROLLO DEL TEMA

Tendencias en monitoreo ambiental agrícola

El monitoreo climático mediante tecnologías de bajo costo ha ganado relevancia en la agricultura sostenible, especialmente en regiones con acceso limitado a infraestructura tecnológica. Investigaciones recientes han demostrado que la integración de sensores económicos, plataformas IoT y comunicación

inalámbrica permite recopilar datos precisos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones agronómicas [1]–[4]. Por ejemplo, Medina Vega [1] desarrolló un sistema basado en IoT y energía solar para zonas remotas, mientras que Amin et al. [2] y Rajak et al. [3] documentan el uso de sensores inteligentes para medir humedad, temperatura y lluvia, demostrando precisión aceptable para aplicaciones agrícolas. Patel et al. [4] destacan la escalabilidad de estas soluciones mediante microcontroladores como Arduino o ESP32 y tecnologías de comunicación como Wi-Fi, LoRa o GSM.

Componentes clave para estaciones de bajo costo

En el contexto de sistemas embebidos aplicados al campo, la selección adecuada de sensores, protocolos de transmisión y plataformas de visualización es crítica. Dispositivos como el DS18B20 para temperatura, el DHT11 para humedad relativa y sensores de efecto Hall para medición de precipitación han mostrado un buen equilibrio entre costo y precisión [5]–[6]. En cuanto a la transmisión de datos, tecnologías como Ethernet o LoRa se emplean dependiendo de la disponibilidad de red. En zonas con acceso a infraestructura LAN, el uso de módulos Ethernet W5100 resulta eficaz para garantizar estabilidad y bajo consumo energético [7]. Para la visualización remota, lenguajes como PHP, HTML y librerías como Chart.js permiten construir interfaces web dinámicas que presentan los datos en tiempo real [8]. La adopción de plataformas abiertas como Arduino facilita la programación modular y el manejo de datos en formatos como JSON, además de permitir escalabilidad y replicabilidad. Estas características hacen de Arduino una opción viable para sistemas de monitoreo ambiental autónomo en el sector agrícola [9].

Dispositivos IoT para monitoreo agrícola

Suman y Kumar [10] destacan que los sistemas IoT fortalecen el uso eficiente de recursos en agricultura de precisión. Moreno Perdomo [11] demuestra que el uso del microcontrolador ESP32, junto con algoritmos de aprendizaje automático, mejora la automatización en invernaderos. Díaz et al. [12] y Mejía Aguirre [13] evidencian que estaciones meteorológicas de bajo costo, alimentadas por energía solar y diseñadas con sensores comerciales, son viables para aplicaciones agrícolas, mejorando la sostenibilidad operativa. De forma complementaria, Dhanaraju et al. [14] y García Aldape et al. [15] confirman que el uso continuo de sensores IoT reduce el desperdicio de insumos y mejora la eficiencia en la producción agrícola. Finalmente, Lad et al. [16] proponen un sistema centrado en el monitoreo y control inteligente de cultivos para maximizar la productividad. Por otro lado, el monitoreo continuo de la temperatura y la humedad relativa incide directamente en decisiones clave como la gestión del riego y la prevención de enfermedades en los cultivos [17]. Asimismo, el acceso a datos precisos posibilita ajustes oportunos en el uso de insumos agrícolas, lo cual mejora tanto la eficiencia como la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.

A partir de esta revisión, se diseñó un sistema de monitoreo ambiental específicamente adaptado al entorno del cultivo de caña. La estación integra sensores de bajo costo, comunicación Ethernet y una plataforma web para la visualización remota. La elección de un microcontrolador de arquitectura abierta (Arduino Mega), el uso de energía solar y la impresión 3D para el diseño estructural responden a criterios de bajo costo, autonomía y adaptabilidad. A diferencia de soluciones comerciales, el sistema propuesto permite modificar tanto el hardware como el software, lo que lo hace escalable y replicable por productores o instituciones sin necesidad de licencias o soporte especializado. Este enfoque permite atender las necesidades específicas del sector cañero en cuanto a monitoreo climático y toma de decisiones en

campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Enfoque Metodológico

El diseño y validación de la estación meteorológica se realizó mediante una metodología iterativa incremental, permitió avanzar de manera estructurada integrando retroalimentación en cada fase del desarrollo para mejorar progresivamente la solución propuesta.

El proceso metodológico se dividió en siete etapas principales: 1. diseño conceptual, 2. selección de sensores, 3. modelado estructural, 4. implementación electrónica, 5. desarrollo de la plataforma web, 6. integración del sistema y 7. pruebas de campo.

La Figura 1 resume gráficamente esta secuencia metodológica.

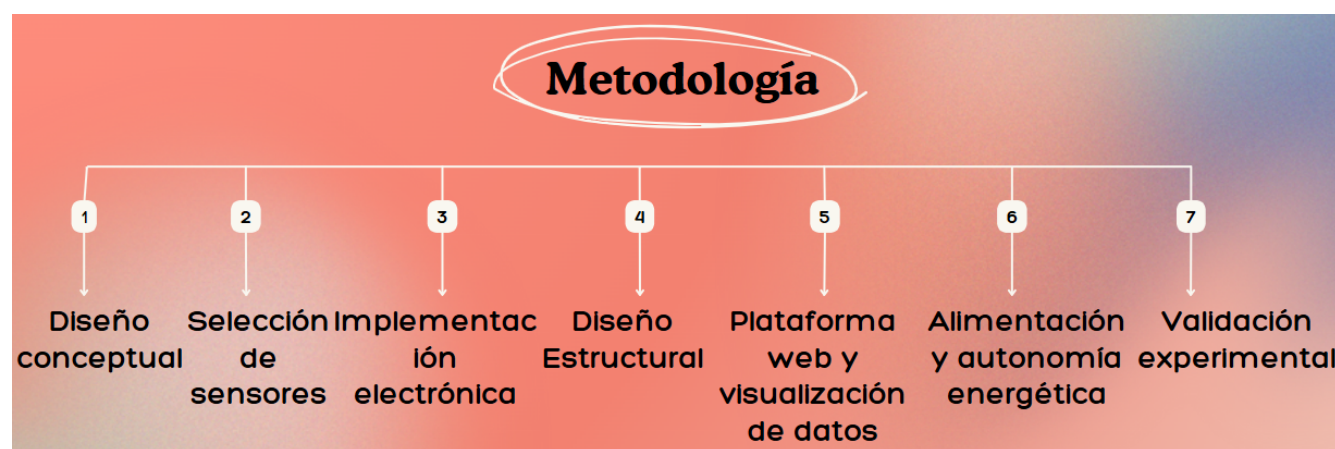


Figura 1: Metodología implementada. Imagen propia.

2. Selección de sensores

La selección de sensores se realizó con base en criterios de compatibilidad con plataformas abiertas, bajo costo, facilidad de integración y precisión suficiente para aplicaciones agrícolas en campo abierto. Se priorizaron dispositivos ampliamente utilizados en proyectos de monitoreo ambiental y con documentación técnica robusta que facilitara su implementación.

Para la medición de temperatura, se seleccionó el sensor DS18B20, un dispositivo digital de un solo hilo que ofrece una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y un rango operativo de -10°C a 85°C . Su bajo consumo energético, facilidad de calibración y compatibilidad directa con microcontroladores Arduino lo convierten en una opción confiable para entornos rurales.

La humedad relativa se midió utilizando el sensor DHT11, que combina temperatura y humedad en un solo módulo, con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ para temperatura y $\pm 5\%$ HR para humedad, adecuado para condiciones ambientales no extremas. Aunque existen sensores más precisos como el DHT22 o el SHT31, el DHT11 fue seleccionado por su menor costo, disponibilidad y desempeño aceptable en condiciones típicas del cultivo de caña.

Para la medición de precipitación, se diseñó un pluviómetro de balancín impreso en 3D, equipado con un sensor de efecto Hall, el cual genera una señal digital por cada oscilación del balancín, equivalente a 1 mm de lluvia. Esta solución permite una integración sencilla con el sistema de adquisición de datos y puede ser calibrada fácilmente para distintos volúmenes.

Todos los sensores fueron seleccionados considerando su desempeño documentado en aplicaciones agrícolas similares y su compatibilidad con el entorno físico, eléctrico y computacional del sistema. La elección también contempló la posibilidad de replicación por parte de usuarios no especializados, lo cual favorece su adopción en distintos contextos del sector cañero.

3. Implementación electrónica

El sistema de adquisición fue gestionado mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560, que permite múltiples conexiones analógicas y digitales. La elección de esta plataforma se basó en su flexibilidad, bajo costo y compatibilidad con sensores ambientales comunes. Estudios recientes han validado su eficacia en sistemas de monitoreo agrícola, destacando su capacidad para programarse de forma modular, gestionar datos en tiempo real y operar con recursos limitados [12], [13]. Para la transmisión remota de información, se integró un módulo Ethernet Shield W5100, conectado al puerto SPI del Arduino Mega. Este módulo permitió establecer una comunicación estable mediante protocolo HTTP y el envío de datos estructurados en formato JSON hacia un servidor web con base de datos MySQL. La programación se realizó empleando las librerías Ethernet.h, SPI.h y ArduinoJson.h, facilitando la gestión de paquetes y la sincronización de datos. El diseño del circuito electrónico se realizó con la plataforma EasyEDA, permitiendo generar tanto el esquema eléctrico como el diseño de una placa PCB personalizada. La disposición de los componentes fue optimizada para reducir interferencias, facilitar el ensamblaje y garantizar una mayor resistencia mecánica. En la Figura 2 se presenta el diagrama de conexión de los sensores.

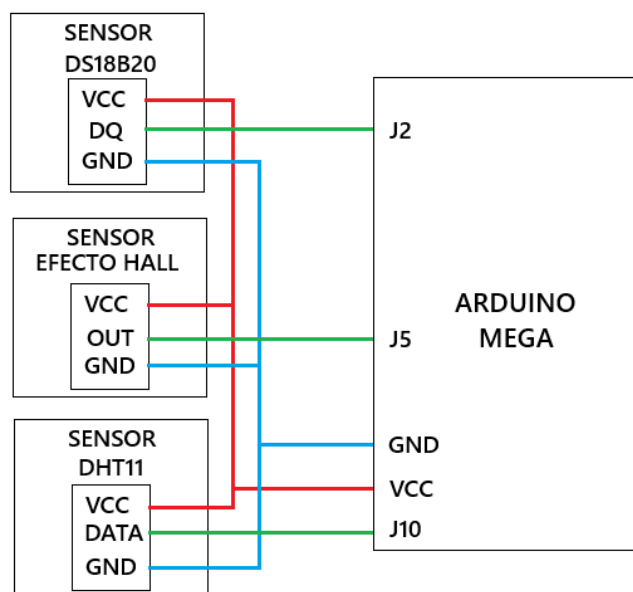


Figura 2: Diagrama de bloques de conexión de sensores. Elaboración propia.

La Figura 3 muestra el diseño físico de la placa PCB desarrollada para integrar los componentes del sistema de monitoreo. Esta placa incluye las conexiones del microcontrolador Arduino Mega 2560 con los sensores DS18B20, DHT11 y el sensor de efecto Hall para el pluviómetro, además del módulo Ethernet W5100. Se incorporaron líneas de alimentación reguladas, protección contra inversión de polaridad mediante diodos y capacitores para estabilización del voltaje. La función principal del diseño electrónico es centralizar y organizar el cableado de los sensores, garantizar la correcta distribución de energía y permitir una transmisión de datos estable hacia la plataforma web. Asimismo, el diseño considera una disposición que minimiza interferencias electromagnéticas y facilita el ensamblaje y mantenimiento del sistema.

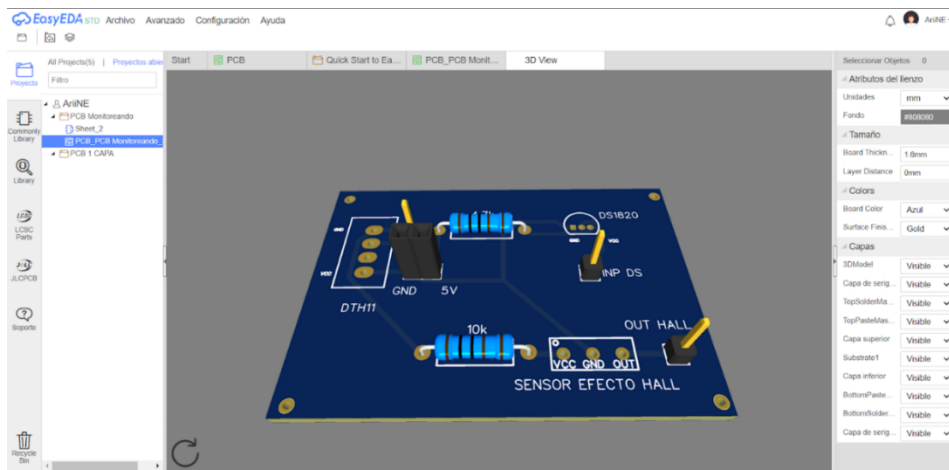


Figura 3: *Diseño de placa PCB. Imagen propia.*

La Tabla 1 resume los principales componentes empleados en el diseño de la estación de monitoreo.

4. Diseño Estructural

La estructura de soporte de la estación fue diseñada utilizando el software de modelado paramétrico SolidWorks, el cual permitió modelar en 2D y 3D cada componente con precisión, ya que ofrece soluciones accesibles, escalables e innovadoras, integrando IA y almacenamiento en la nube para un diseño más eficiente [18]. y fabricada combinando acero galvanizado (para el mástil principal) y piezas impresas en 3D con filamento PLA (para soportes de sensores y componentes del pluviómetro). El diseño fue validado mediante análisis estático para simular esfuerzos provocados por vientos de hasta 25 km/h, con deformaciones dentro del límite elástico del material. La Figura 4 muestra el diseño de la estructura.

5. Plataforma web y visualización de datos

Se desarrolló una interfaz dinámica mediante PHP, HTML, CSS y JavaScript, utilizando la librería Chart.js para visualizar en tiempo real las variables registradas. El sistema web permite acceder a datos

Tabla 1: Componentes del sistema de monitoreo.

Categoría	Elemento	Características principales
Sensores	DS18B20	Temperatura digital, $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, 10°C a 85°C
	DHT11	Temp. y humedad, $\pm 2^{\circ}\text{C}$ / $\pm 5\%$ HR, 050°C , 2080 % HR
	Sensor Hall + pluviómetro	Balancín impreso 3D, señal digital por basculamiento
Controlador	Arduino Mega 2560	ATmega2560, múltiples pines analógicos/digitales
Comunicación	Ethernet Shield (W5100)	Conexión LAN, protocolo HTTP/JSON
Alimentación	Panel solar monocristalino 6W	12VDC, 500mA, batería de respaldo
Diseño electrónico	EasyEDA	Diseño y simulación de circuito impreso PCB
Diseño estructural	Acero galvanizado + piezas en PLA	Modelado CAD, piezas menores impresas en 3D
Visualización web	PHP, HTML, CSS, Chart.js	Interfaz dinámica con gráficas en tiempo real

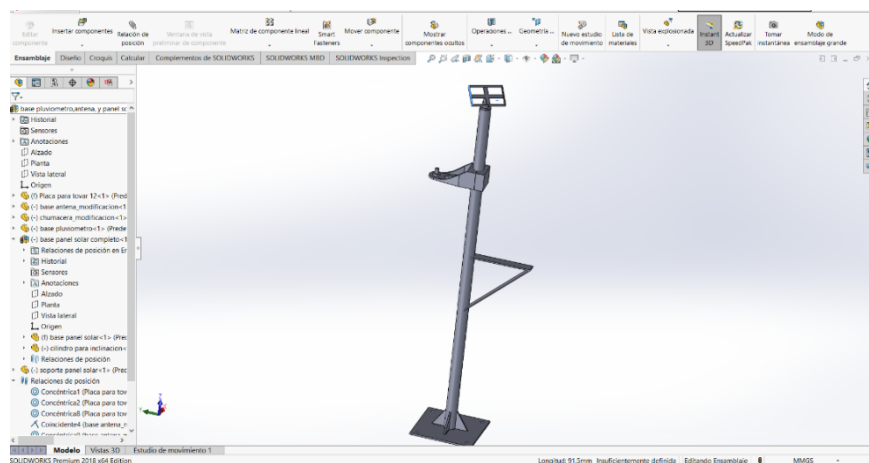


Figura 4: Diseño de la estructura del sistema. Imagen propia.

históricos, generar gráficas por variable y consultar alertas personalizadas desde dispositivos móviles o equipos de escritorio. La base de datos se estructuró en MySQL y fue optimizada para registrar datos cada 5 minutos.

6. Alimentación y autonomía energética

El sistema fue alimentado mediante un panel solar monocristalino de 6 W (12 V, 500 mA), conectado a una batería recargable. La autonomía energética fue verificada con mediciones continuas durante 24 horas mediante un multímetro de pinza y un medidor de consumo tipo Kill-A-Watt, determinando un consumo diario promedio de 0.07 kWh.

7. Validación experimental

El prototipo fue instalado en un campo de cultivo de caña en Tamazula de Gordiano, Jalisco, donde se realizaron pruebas durante 30 días continuos. Las variables registradas se compararon con instrumentos de referencia y con una estación meteorológica oficial de CONAGUA, ubicada en Ciudad Guzmán, Jalisco. Se evaluaron la precisión de sensores, el desempeño energético y la integridad de la estructura.

RESULTADOS

La evaluación del prototipo de estación de monitoreo ambiental se realizó con base en cuatro ejes principales: (1) Validación estructural, (2) desempeño energético del sistema autónomo con panel solar, (3) Funcionamiento del sistema en campo (temperatura, humedad y pluviómetro), y (4) desempeño funcional en condiciones reales de campo. A continuación, se detallan los hallazgos obtenidos en cada fase, respaldados por simulaciones computacionales, pruebas de laboratorio y mediciones en campo.

Validación estructural

En la validación estructural, se consideró un acero galvanizado con propiedades mecánicas equivalentes al acero AISI 1018, cuyo límite elástico es de aproximadamente 370 MPa. El análisis estático realizado en SolidWorks mostró un esfuerzo máximo de 13.8 MPa, lo cual representa apenas el 3.73 % del límite elástico del material. Este margen de seguridad confirma que la estructura puede soportar adecuadamente las condiciones de carga previstas, sin riesgo de deformación permanente ni falla estructural. Se consideraron combinaciones de carga propias del mástil, el panel solar y los componentes electrónicos montados en la parte superior. La Figura 5 presenta las propiedades del material utilizado.

En la Figura 6 se aprecia el análisis estático de la pieza usando acero aleado, similar al material real. Se fijaron cuatro puntos en los orificios de la placa y se aplicó una fuerza lateral de viento de 0,4 N, calculada a partir de una velocidad de 10 km/h y una superficie de 0,063 m² con un coeficiente aerodinámico de 1 y una densidad del aire de 1.29 kg/m³. Las flechas azules indican la dirección de la fuerza y los verdes, los puntos de sujeción.

La Figura 7 muestra, en vista lateral, la deformación provocada por la fuerza aplicada, junto con las tensiones máxima y mínima. Estos se mantienen por debajo del límite elástico del material, por lo que, aunque haya deformación, no existe riesgo de fractura en la estructura.

Consumo Energético y Autonomía del sistema

La autonomía energética del sistema fue evaluada considerando el consumo eléctrico de cada com-

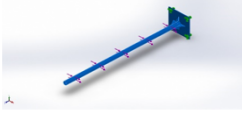
Propiedades de material		
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Acero aleado Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: máx. Tensión de von Mises Límite elástico: 6.20422e+08 N/m² Límite de tracción: 7.23826e+08 N/m² Módulo elástico: 2.1e+11 N/m² Coefficiente de Poisson: 0.28 Densidad: 7700 kg/m³ Módulo cortante: 7.9e+10 N/m² Coefficiente de dilatación térmica: 1.3e-05 /Kelvin	Sólido 1 (Redondeo1)(Placa para tovar 12)
Datos de curva: N/A		

Figura 5: Propiedades del material utilizado para la estructura. Imagen propia.

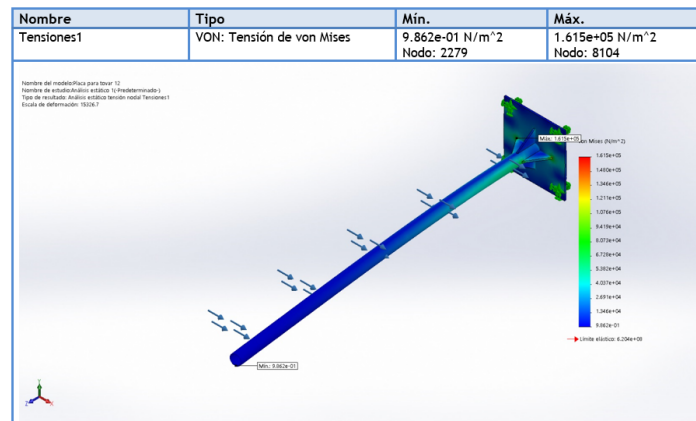


Figura 6: Resultado del análisis estático de la estructura. Imagen propia.

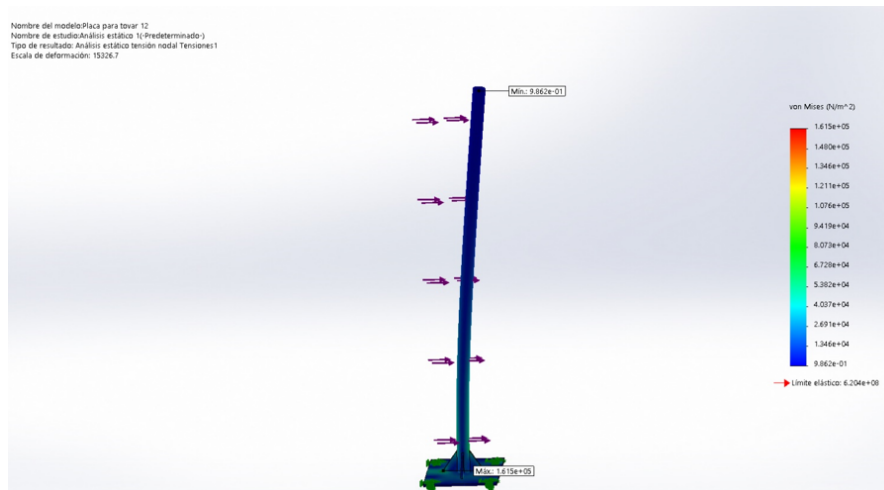


Figura 7: Vista lateral de deformación debida a la fuerza aplicada. Imagen propia.

ponente. El microcontrolador Arduino Mega 2560 presenta un consumo promedio de 90 mA, el módulo Ethernet W5100 aproximadamente 150 mA durante transmisión, y los sensores DS18B20, DHT11 y el sensor de efecto Hall aportan un consumo conjunto inferior a 10 mA. En conjunto, el sistema demanda una corriente promedio de 250 mA a 5 V, lo que equivale a un consumo diario de aproximadamente 0.07 kWh, coincidente con las mediciones empíricas. La batería recargable conectada al panel solar tiene una capacidad de 7 Ah a 12 V, proporcionando una energía útil de 84 Wh, suficiente para mantener el sistema operando de manera continua por más de 3 días sin recarga solar. Este análisis confirma que la configuración energética es adecuada para entornos rurales con irradiación variable. La Figura 8 muestra las mediciones registradas con el KILL A WATT y la Figura 9 las mediciones con el amperímetro.



Figura 8: Consumo de energía en un periodo de 24 horas. Imagen propia.



Figura 9: Consumo de corriente del dispositivo. Imagen propia.

Funcionamiento del sistema en campo

El prototipo se instaló en una parcela de caña en Tamazula de Gordiano, Jalisco, y operó durante 30 días consecutivos. Se logró la adquisición y transmisión de datos cada 5 minutos sin interrupciones. Las

variables medidas se compararon con una estación meteorológica de referencia (CONAGUA, Ciudad Guzmán), cuyos datos se recolectaron en paralelo durante el periodo de prueba. En la Figura 10 se añadieron las mediciones correspondientes de corriente y consumo energético obtenidas en la estación desarrollada, junto con los valores equivalentes de la estación comercial para el mismo intervalo de tiempo. Esta comparación permite visualizar las diferencias en el comportamiento de ambas estaciones y validar la precisión del sistema propuesto. Los datos muestran una concordancia aceptable, confirmando la viabilidad del prototipo como alternativa de bajo costo con desempeño técnico confiable.

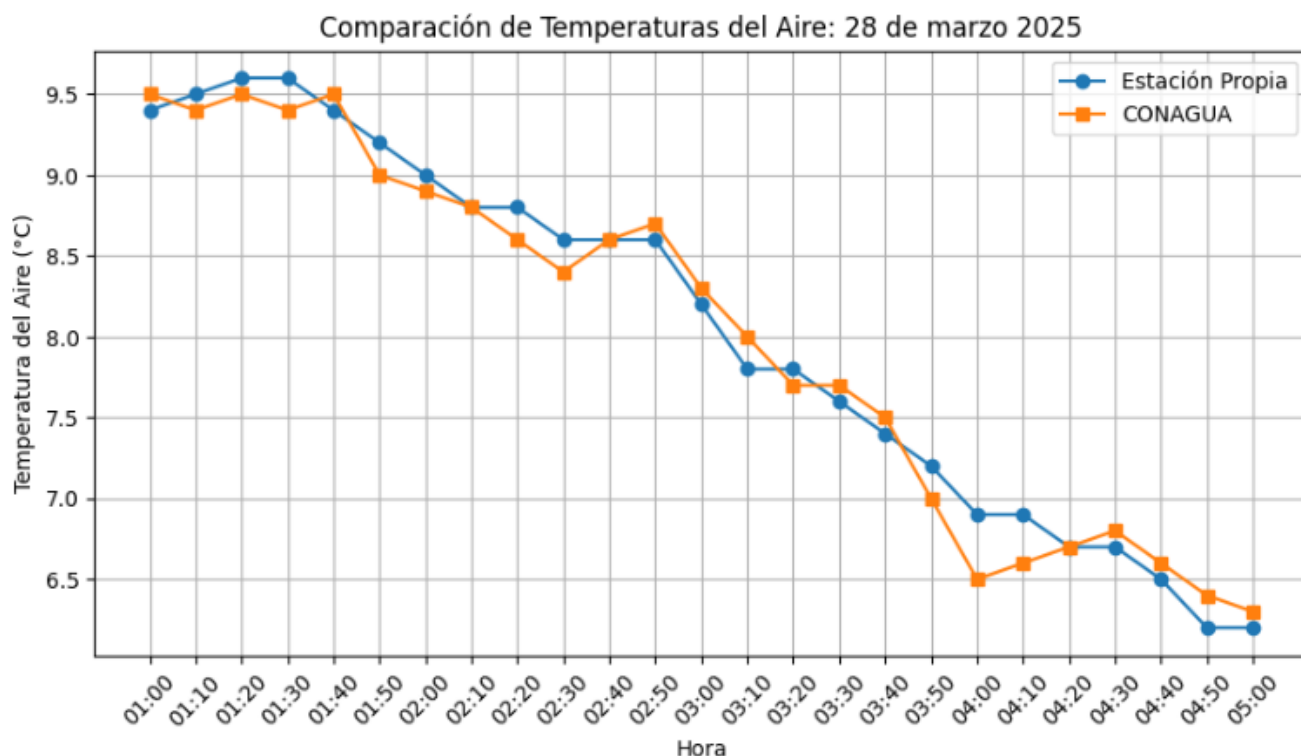


Figura 10: *Comparación de medición de temperaturas entre estación propia y CONAGUA. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA [19].*

Además, se cuantificó el error promedio en las mediciones del prototipo frente a la estación oficial de CONAGUA (Ciudad Guzmán), como se presenta en la Tabla 3. Los resultados se mantienen dentro de rangos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Tabla 3: Comparación de mediciones con estación de referencia.

Variable	Error promedio	Rango aceptable
Temperatura	± 0.3 °C	± 1.0 °C
Humedad relativa	± 4 % HR	± 6.0 % HR
Precipitación	± 1.0 mm	± 1.2 mm

Visualización web y plataforma

La interfaz web mostró correctamente los datos en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a internet local. Se accedió mediante dirección IP fija, con actualización automática de gráficas. El sistema permite seleccionar rangos de fechas, exportar datos y generar alertas por valores límite.

La Figura 11 muestra la estación instalada y su configuración final. En ella se instalaron: la antena (color azul), la base para el panel solar (color blanco) y el pluviómetro (color café).



Figura 11: *Instalación de la estación de monitoreo. Imagen propia.*

En la Figura 12 se presenta la gráfica generada en la página web que fue desarrollada, en la cual se visualiza la información de precipitación, temperatura y humedad relativa recopilada durante un día completo.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la estación de monitoreo desarrollada representa una alternativa viable, precisa y de bajo costo frente a sistemas comerciales existentes. La validación estructural y energética, así como la comparación de sensores con equipos de referencia, confirman que el sistema cumple con los rangos técnicos aceptables para aplicaciones agrícolas.

Comparación con sistemas comerciales

Al comparar el prototipo con estaciones meteorológicas comerciales como la MK-III RTN-LR, Agro-Met y MSO ICT International, se identifican diferencias significativas en costo, escalabilidad y flexibilidad. Mientras que los equipos comerciales superan los \$20,000 MXN y dependen de plataformas propietarias, el sistema desarrollado tiene un costo aproximado de \$4,500 MXN y permite modificaciones

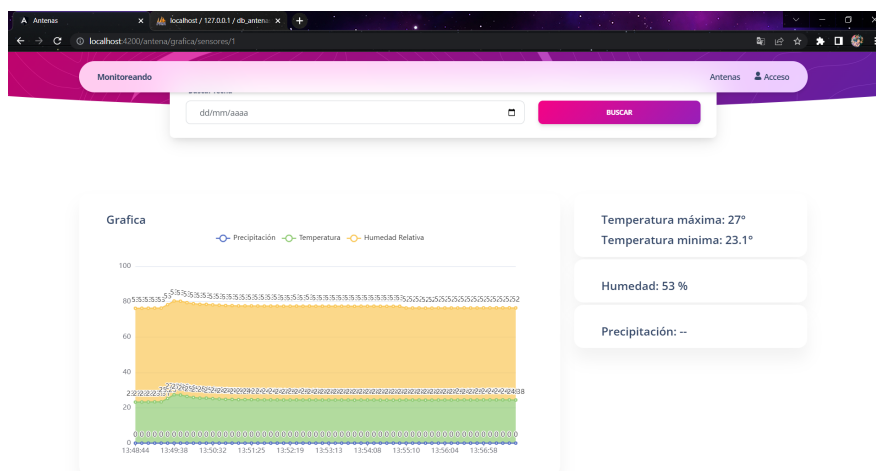


Figura 12: Gráfica de las mediciones mostradas en la página Web. Imagen propia.

tanto de hardware como de software. Además, utiliza sensores de gama media con desempeño aceptable, y permite la visualización web independiente sin requerir suscripciones o soporte externo. Aunque los sistemas comerciales ofrecen mayor precisión y variables adicionales como presión atmosférica o velocidad del viento, el prototipo desarrollado cubre las variables más relevantes para el sector cañero con un enfoque de bajo costo y alta adaptabilidad.

Ventajas operativas del prototipo

El sistema demostró ser robusto en campo, operando durante 30 días sin interrupciones. La autonomía energética, asegurada por un panel solar de 6 W, elimina la dependencia de fuentes externas. La visualización remota mediante plataforma web accesible desde cualquier navegador permite decisiones rápidas y basadas en evidencia. Además, la estructura modular facilita la sustitución de componentes y la integración de nuevos sensores, lo cual es difícilmente posible en sistemas comerciales cerrados.

Alcance técnico y replicabilidad

El uso de microcontroladores abiertos y sensores accesibles permite replicar el sistema en diferentes contextos agrícolas. La compatibilidad con tecnologías de análisis como inteligencia artificial o big data ofrece oportunidades para la expansión funcional del sistema, particularmente en predicción de variables climáticas y análisis multivariado.

Limitaciones observadas

- La precisión de los sensores, aunque aceptable, no alcanza niveles industriales.
- La conectividad Ethernet puede limitar su uso en zonas sin infraestructura LAN (aunque podría sustituirse por módulos LoRa/ESP32 en futuras versiones).
- La estructura, si bien resistente, podría optimizarse para velocidades de viento superiores a 25 km/h si se instalan en zonas expuestas.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la estación de monitoreo ambiental demostró ser una solución eficiente, económica y tecnológicamente viable para la recolección automatizada de datos climáticos en el sector cañero. Este proyecto sustituye procesos manuales propensos a errores, costosos y poco sostenibles, mediante una alternativa accesible y de bajo consumo energético. Los principales hallazgos y aportaciones se resumen en los siguientes puntos:

- Automatización efectiva del proceso de monitoreo climático, logrando una reducción del tiempo invertido en más del 80 % al eliminar la necesidad de recorridos físicos, gracias al acceso remoto a los datos desde una plataforma web amigable.
- Minimización del error humano, ya que la medición y el registro de variables como temperatura, humedad y presencia de fenómenos magnéticos fueron completamente automatizados, lo que garantiza una mayor confiabilidad de los datos obtenidos.
- Optimización de recursos humanos y logísticos, permitiendo que el personal técnico se enfoque en tareas de análisis y toma de decisiones, en lugar de actividades repetitivas de campo.
- Importante ahorro económico, al desarrollar un sistema propio con un costo aproximado 75 % inferior al de las estaciones meteorológicas comerciales con capacidades similares, lo cual democratiza el acceso a esta tecnología en pequeñas y medianas unidades de producción agrícola.
- Precisión validada experimentalmente, con márgenes de error dentro de los parámetros aceptables para aplicaciones agrícolas ($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ para temperatura, ± 4 % para humedad relativa y ± 2.5 % para precipitación), lo cual respalda su confiabilidad para decisiones agronómicas.
- Autonomía energética garantizada, mediante un panel solar de 6 W que alimenta el sistema completo con un consumo promedio de tan solo 0.07 kWh diarios, lo que lo hace apto para regiones sin acceso a la red eléctrica.
- Diseño modular y escalable, que permite su adaptación a diversas condiciones agrícolas, su expansión con sensores adicionales (p. ej., para CO₂, velocidad del viento, pH del suelo) y su integración con otros sistemas de monitoreo.
- Plataforma abierta y flexible, que no solo facilita su replicación y mejora continua, sino que permite la implementación futura de algoritmos de análisis de datos y modelos predictivos basados en inteligencia artificial, incrementando su valor estratégico en la agricultura de precisión.

La estación desarrollada representa un paso significativo hacia la digitalización del sector agrícola, especialmente en zonas donde los recursos económicos y tecnológicos son limitados. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al análisis predictivo, la toma de decisiones automatizada y la gestión integral del clima agrícola en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez, Unidad Académica Tamazula por brindar el respaldo institucional necesario para el desarrollo de este proyecto. De manera especial, expreso mi reconocimiento a la directora, Mtra. Brenda Yerania Ortega Flores, por su apoyo y disposición para fomentar la investigación y la mejora continua en nuestra institución.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Jorge Alberto Cárdenas Magaña: Investigación, Conceptualización, Metodología, Software, Redacción - Revisión y Edición.

REFERENCIAS

- [1] G. Medina Vega. *Desarrollo de un sistema de monitoreo meteorológico de bajo costo basado en tecnología IoT*. Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, San Juan del Río, Qro., México, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/9793/1/IGLIN-272308.pdf>
- [2] M. S. Amin, S. T. H. Rizvi, U. Iftikhar, S. Malik y Z. B. Faheem. IoT Based Monitoring and Control in Smart Farming. En *2021 MAJICC*, Karachi, Pakistán, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/MAJICC53071.2021.9526247
- [3] P. Rajak, A. Ganguly, S. Adhikary y S. Bhattacharya. Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 14, art. 100776, dic. 2023. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100776
- [4] K. J. Naidu et al. Sistema de monitoreo de agricultura de precisión. *Biotech Research Asia*, vol. 21, no. 4, 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.13005/bbra/3324>
- [5] J. P. Tovar Soto et al. Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos*, no. 22, pp. 86–105, jul.–dic., 2019. doi: <https://doi.org/10.21501/21454086.3253>
- [6] Y. Song, J. Bi y X. Wang. Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, vol. 25, abril 2024, art. 101029. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>
- [7] N. Jaliyagoda et al. Internet of things (IoT) for smart agriculture: Assembling and assessment of a low-cost IoT system for polytunnels. *PLoS One*, vol. 18, no. 5, e0278440, mayo 2023. Erratum: vol. 18, no. 12, e0296110, dic. 2023. doi: 10.1371/journal.pone.0278440
- [8] S. R. S. Goud, S. V. R. Goud y B. S. Kumar. Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. *Electronics*, vol. 9, no. 2, art. 319, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/2/319>. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9020319>

-
- [9] G.-E. Chanchí-Golondrino, M.-A. Ospina-Alarcón y M. Saba. Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista científica*, vol. 44, no. 2, pp. 257–271, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5043/504371984008/html/>. doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>
- [10] K. G. Suman y D. Kumar. Role of IoT in Smart Precision Agriculture. En *Handbook of Metrology and Applications*, 1ª ed., Springer, 2023, pp. 1217–1238. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2074-7_66
- [11] E. J. Moreno Perdomo. Sistema Inteligente de automatización, monitoreo y control de invernaderos mediante uso de IoT y el microcontrolador ESP-32 con aplicación de aprendizaje automático. En *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2023*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2818>. doi: <https://doi.org/10.26507/paper.2818>
- [12] J. L. Díaz Martínez et al. Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual y su aplicación mediante un prototipo. *Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de Información (RISTI)*, vol. 53, pp. 106–121, mar. 2024. [En línea]. Disponible en: <https://scielo.pt/pdf/rist/n53/1646-9895-rist-53-106.pdf>. doi: <https://doi.org/10.17013/risti.53.106-121>
- [13] C. J. Mejía Aguirre. Desarrollo de dispositivo IoT para monitoreo agrícola de bajo costo. Tesis de Maestría en Sistemas Embebidos, INFOTEC, Aguascalientes, 2020. [En línea]. Disponible en: https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/408/1/INFOTEC_MSE_CJMA_14092020.pdf
- [14] M. Dhanaraju, P. Chenniappan, K. Ramalingam, S. Pazhanivelan y S. Kaliaperumal. Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, vol. 12, no. 10, p. 1745, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/10/1745>. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- [15] H. García Aldape, E. Chávez López, C. A. Reyes del Ángel y O. D. Oyarvide Martínez. Monitoreo de cultivos con Internet de las Cosas por medio de una red de sensores. *Tectzapic*, vol. 8, no. 2, pp. 9–20, dic. 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9591132.pdf>. doi: <https://doi.org/10.51896/tectzapic/NFOG6958>
- [16] A. Lad, S. Nandre, K. Raichurkar, S. Zarkhande y P. Charles. A literature survey on smart agriculture monitoring and control system using IoT. *International Journal of Research in Applied Science and Engineering Technology*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.ijraset.com/research-paper/smart-agriculture-monitoring-and-control-system-using-iot>. doi: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40512>

- [17] A. Secure. Soluciones para una estación meteorológica agrícola eficiente. *AlaI Secure*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://alaisecure.pe/blog/soluciones-para-una-estacion-meteorologica-agricola-eficiente/>. [Accedido: 12-mar-2025]
- [18] SOLIDWORKS. Una solución probada para el diseño y desarrollo de productos en 3D. *SolidWorks*. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/lp/proven-solution-3d-design-and-product-development>. [Consulta: 13-mar-2025]
- [19] Servicio Meteorológico Nacional. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's). Comisión Nacional del Agua, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>