



Investigación aplicada e innovación

Volumen 18, 2024 Lima, Perú • ISSN: 1996-7551 - e-ISSN: 2707-9368

Jaime Gómez Marín

Implementación de una librería en Python para evaluar el uso del Quipu en el aprendizaje de la programación en estudiantes

Pág. 7

Brian Pareja Meruvia

Desafíos de la Realidad Extendida en la Educación Técnica: Una Revisión Sistemática

Pág. 17

Tecsup®

Director: Antonio Lazo de la Vega, *Tecsup*

Editor en jefe: Hernando Prada, *Tecsup*.

Comité editorial: Aurelio Arbildo, *Inducontrol*; Carlos Hernández, *Alicorp*; Elena Flores, *UTEC*; Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*.

Coordinador editorial: Diego Nishimazuruga Lima

Colaboradores: Edgardo Huertas Bruno, Evelyn Ruiz Castillo, César Manyari Geldres, Juan Corcuera Urbina, Willy Ramírez Quiroz, Juan Cámac Valdez, Fidel Matos Casas, Anahí Arica Sánchez, Jorge Pérez Villa, Walter Moncada Rubio, Omar Castañeda Rodríguez, José Rojas Gómez, Augusto Valdivia Garate, Mauricio Surco Valenzuela, Pablo Padilla Ferruzo, Jan Beeck Peeper, Aaron Garate Suyo, César Bobadilla Medina, Alan Ramos Liendo, Alfredo Pacheco Effio, Flor Balbín López, Oscar Mansilla Alza, Jorge Castillo Migone y Carmen Flores Barreda.

Correctora de estilo: Laura Gómez Rojas

Diagramación: Tarea Asociación Gráfica Educativa

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706

Publicado en diciembre 2024

Tecsup:

Sede Norte:

Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú.

Sede Centro:

Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima, Perú.

Sede Sur:

Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú.

Publicación:

Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

Publicación Indexada en Latindex



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Suscripciones:

investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe

Página Web:

<https://revista.tecsup.edu.pe>

Nota: Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.



Revisa todas las ediciones de la Revista I+i en versión digital

ÍNDICE

Implementación de una librería en Python para evaluar el uso del quipu en el aprendizaje de la programación en estudiantes

..... Jaime Gómez Marín
7

Desafíos de la realidad extendida en la educación técnica: una revisión sistemática

..... Benjamin Pareja
17

Caracterización y microgasificación de *pellets* de biomasa a partir de residuos leñosos para cocción y calefacción

..... Walter Gonzales Arnao
..... Javier Verastegui Lazo
33

Transformando la educación: impacto de la impresión 3D en el proceso de enseñanza-aprendizaje en SST

..... Fernando Hugo Humpiri Montoya
..... McDonald Villacorta Choque
45

Modelo de series de tiempo para predecir la demanda de atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

..... José Luis Espinoza Melgarejo
59

Exploración de la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de las rocas

..... Carlos Yungo, Rubén Coaguila
..... Walter Bedregal
..... Edwin Santos
73

Pretratamiento oxidativo de aguas residuales con carga orgánica procedentes de la ultrafiltración aplicada para fabricar leche deslactosada

..... Yorsel Mayhua
..... Enrique Ames
..... Ulises Quiroz
83

Brecha salarial de género en el Estado peruano: un análisis desde la ciencia de datos

..... Roberto León Leyva
95

Estudio de cargabilidad de cables subterráneos en redes eléctricas de media tensión y propuesta para incrementar la ampacidad

..... Oscar Peña
..... Walter Estrada
115

Evaluación del desempeño de los sistemas de control automático en aeronaves comerciales y privadas en el simulador de vuelo FSX

..... Teódulo Severino Castillo Arce
..... Ricardo Wilber Ccoyure Tito
129

Optimización de reinstalación de *software* en laboratorios de cómputo académicos de un instituto superior mediante clonación automatizada

..... Luis Angel Portocarrero
..... María Fernanda Condori
149

Estudio del consumo de combustible y eficiencia del motor CAT C9 a diversos regímenes de r. p. m. mediante el uso de dinamómetro de pruebas

..... Christopher Reategui
..... José Alvarado, Brayan Garrido
157

Biotecnología aplicada en la obtención de ácido cítrico por fermentación de azúcar por parte del moho del género *Aspergillus* de fuente ambiental

..... Laurence Salmon Barrantes
..... Frank Yamir Paredes Vásquez
..... Luz Milagros Daza Concha
167

Evaluación de la calidad de agua generada por un equipo purificador para uso en laboratorios de análisis químico

..... Ivan Gonzales
..... Cristian Sánchez Ríos
175

Acceso remoto a laboratorios de informática como facilitador del aprendizaje activo en carreras técnicas

..... Godofredo Díaz
..... Jaime Farfán
183

EDITORIAL

Apreciados lectores,

Nos complace darles la bienvenida al volumen 18 de nuestra revista I+i, en la que seguimos comprometidos con la difusión de investigaciones tecnológicas aplicadas que impactan en el desarrollo de nuestra sociedad. Este año, continuamos explorando cómo las tecnologías emergentes y los enfoques innovadores están transformando sectores clave como la educación, la salud, la sostenibilidad y la industria.

La edición actual reúne 15 artículos que reflejan el dinamismo de nuestra comunidad académica y su capacidad para abordar los desafíos contemporáneos desde múltiples perspectivas. Entre los temas destacados, encontramos enfoques disruptivos en la enseñanza, como el uso del Quipu en la programación, el impacto de la realidad extendida y la impresión 3D, además de soluciones tecnológicas innovadoras como el acceso remoto a laboratorios.

Asimismo, este volumen pone un énfasis especial en la sostenibilidad y la eficiencia energética. Resaltamos investigaciones sobre el aprovechamiento de biomasa para calefacción, la mejora de procesos en redes eléctricas y la fermentación biotecnológica para producir ácido cítrico. Estos trabajos no solo representan avances técnicos, sino también compromisos concretos con el cuidado del medio ambiente.

En el ámbito de la salud, encontramos investigaciones sobre la predicción de la demanda de atención para enfermedades crónicas, la calidad del agua en laboratorios y el control automático en aeronaves, todas orientadas a mejorar la calidad de vida y garantizar mayor seguridad.

Finalmente, el enfoque social de esta edición aborda temas como el análisis salarial en Perú utilizando la ciencia de datos, y modelos de aprendizaje activo para una educación técnica más inclusiva y accesible.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los autores que comparten sus valiosas investigaciones, al equipo editorial por su incansable labor y a ustedes, nuestros lectores, por ser parte activa de esta comunidad. Los invitamos a participar en futuras ediciones y a seguir contribuyendo al crecimiento del conocimiento aplicado.

Sigamos avanzando juntos hacia un futuro donde la innovación y la investigación impulsen un cambio significativo en nuestra sociedad.

Atentamente,

Antonio Lazo de la Vega Velarde
Director Académico Nacional

Biblioteca Quipu aplicada en entornos educativos para el aprendizaje de un lenguaje de programación.

HTML



CODE LANGUAGE



```
.site-footer {  
  padding: 4em 0;  
  ul {  
    li {  
      margin-bottom: 10px;  
      a {  
        color: $gray-100;  
        &:hover {  
          color: $primary; }  
      }  
    }  
  }  
}  
  
.footer-heading {  
  font-size: 20px;  
  color: $gray-1;  
}
```

Implementación de una librería en Python para evaluar el uso del quipu en el aprendizaje de la programación en estudiantes

Implementation of a Python Library to Evaluate the Use of Quipu in Programming Learning in Students

RESUMEN

El estudio se centra en proponer un enfoque innovador para la enseñanza de la programación a través de la creación de una biblioteca en Python que permite simular un quipu numérico incaico, la biblioteca puede ser usada en aplicaciones de escritorio con los sistemas operativo Windows, Linux o MacOS. El objetivo es incentivar a los estudiantes de educación secundaria o estudiantes de los primeros años de estudios de carreras de corte digital en el aprendizaje de un lenguaje de programación como Python y valorar el legado cultural de una herramienta ancestral de almacenamiento de datos como es el quipu.

La biblioteca desarrollada para este estudio permite simular un quipu numérico incaico con la representación de números de cuatro dígitos y su verificador de sumas, esto facilitará rastrear el progreso de aprendizaje de estudiantes, analizar patrones de enseñanza y evaluar la comprensión mediante ejercicios interactivos complementados con la confección de un quipu numérico real. La biblioteca fue posteriormente publicada en el repositorio oficial del lenguaje de programación Python (PyPI) con el nombre de Quipudigital con licencia GPL-3.0 para que pueda ser usada por la comunidad de desarrolladores o interesados en el aprendizaje de la programación en Python.

La metodología de investigación ha sido desplegar la biblioteca del quipu en un entorno educativo para recopilar datos empíricos sobre el rendimiento y la percepción del aprendizaje de los estudiantes. En cuanto a los hallazgos principales, fue descubrir el interés que tuvieron los estudiantes en aprender un nuevo lenguaje de programación después de comprender la simbología de nudos y notación decimal empleados en los quipus numéricos incaicos. La curiosidad por saber cómo se simulaba la simbología de nudos y representación decimal de un quipu

en un sistema de cómputo facilitó el interés en el aprendizaje del lenguaje de programación Python. Este estudio se realizó en dos etapas, la primera etapa fue en la Semana de Proyectos del Colegio Alexander Von Humboldt de Miraflores (mayo 2024) y la segunda etapa durante el semestre del 2024-1 del Instituto de Educación Superior Tecsup (Lima).

Se puede concluir que el uso de lenguajes de programación complementados con herramientas de almacenamiento de datos ancestrales ayuda a fortalecer de forma efectiva la enseñanza en lenguajes de programación y revalorizar el uso del quipu.

ABSTRACT

This study focuses on proposing an innovative approach to teaching programming through the creation of a library in Python that allows simulating an Inca numerical Quipu. The library can be used in desktop applications with Windows, Linux or macOS operating systems. The objective is to encourage secondary education students or students in the first years of digital career studies to learn a programming language such as Python and value the cultural legacy of an ancestral data storage tool such as the Quipu.

The library developed for this study allows us to simulate an Inca numerical Quipu with the representation of 4-digit numbers and its sum verifier. This will facilitate tracking the learning progress of students, analyzing teaching patterns and evaluating understanding through interactive exercises complemented with real numerical Quipu. The library has been published in the official repository of the Python programming language (PyPI) under the name Quipudigital, with a GPL-3.0 license so that it can be used by the community of developers or those interested in learning Python programming.

Palabras Claves

Enseñanza de la programación, quipu, Python, biblioteca en Python, Lenguajes de programación, quipu numérico incaico, PyPI.

Key words

Teaching programming, Quipu, Python, Python library, Programming languages, Inca numerical Quipu, PyPI.



The research methodology involved deploying the Quipu library in an educational environment to collect empirical data on students' performance and perception of learning. The main findings revealed that students developed a strong interest in learning a new programming language after understanding the symbolism of knots and decimal notation used in the Inca numerical Quipu. Curiosity about how the symbolism of nodes and the decimal representation of a Quipu were simulated in a computing system sparked interest in learning the Python programming language. This study was carried out in two stages, the first stage was during the Project Week of the Alexander Von Humboldt School in Miraflores (May 2024) and the second stage during the 2024-1 semester of the Tecsup Higher Education Institute (Lima).

It can be concluded that the use of programming languages complemented with ancestral data storage tools helps to effectively strengthen teaching in programming languages and revalue the use of the Quipu.

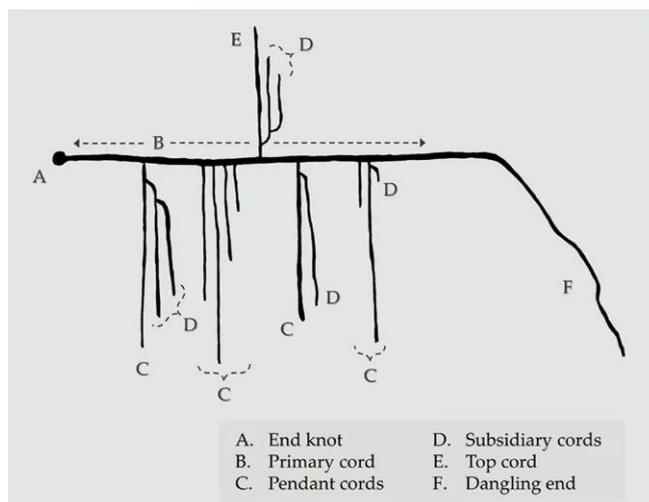


Figura 1. Partes de un quipu canónico

Fuente: [11].

Los quipus canónicos de los incas emplean un sistema numérico decimal. Cada posición del cordón colgante (*pendant cords*) representa un valor posicional de números enteros, desde las unidades, ubicadas en el extremo del cordón, hasta el valor de diez mil, situado más cerca del cordón principal (*primary cord*). Los números se representan colocando nudos específicos en las posiciones correspondientes al valor posicional [9].

- 0 está representado por un cordón vacío o una posición de valor posicional vacía.
- El número 1, cuando se coloca en el lugar de las unidades, está representado por un nudo en forma de ocho (*eight knot*).
- Los números del 2 al 9, cuando se colocan en el lugar de las unidades, se representan mediante un nudo largo (*long knot*) con el respectivo número de vueltas.
- Los valores de 10 o más están representados por un número correspondiente de nudos simples (*single knot*) dentro de su respectiva posición de valor posicional.

En la figura 2, se muestran los diferentes tipos de nudos empleados en los quipus canónicos, como abreviación se usan las letras **L**, **s** y **E**

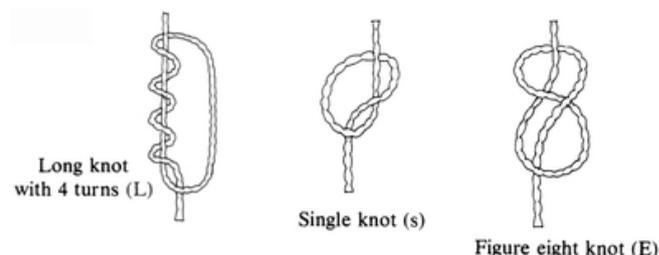


Figura 2. Diferentes tipos de nudos en los quipus canónicos

Fuente: [1].

INTRODUCCIÓN

La palabra quipu significa 'nudo' en quechua y fue un instrumento para almacenar información mediante cuerdas de lana o algodón de distintos colores, provistas de nudos. Al principio, se creía que este sistema solo registraba datos contables. Más tarde, las crónicas españolas afirmaron que también se utilizaba para decodificar relatos, historias y cartas, aunque todas las claves se perdieron con el tiempo, a partir de la conquista española en el siglo XVI [10].

Se han realizado varios estudios para entender el significado de los quipus. Resaltaremos tres investigaciones: la primera, llevada a cabo por Marcia Ascher y Robert Ascher, es reconocida por aplicar, por primera vez, análisis matemáticos a los quipus. En su libro *Code of the Quipu: A Study in Media, Mathematics, and Culture* [1], exploran cómo los quipus funcionaban como un medio de comunicación en la civilización inca. La segunda investigación, realizada por Hugo Pereyra Sánchez, titulada *Acerca de los quipus con características numéricas excepcionales* [12], demuestra que los quipus podrían representar medidas angulares, basándose en un modelo de regresión lineal. La tercera es la publicación de Manuel Medrano, *Quipus, mil años de historia anudada en los Andes y su futuro digital* [4], donde analiza la importancia histórica y cultural de los quipus y su potencial en el contexto digital moderno, destacando la relevancia de su digitalización para aplicar técnicas avanzadas en su desciframiento.

En este estudio nos centraremos en el quipu canónico¹ de la cultura inca, que se utilizó como herramienta para almacenar datos numéricos. Su diagrama se muestra en la figura 1.

¹ También son conocidos como los quipus numéricos.

En la figura 3, se muestra la representación de varios números utilizando la notación de nudos presentada en la figura 2, según Marcia Ascher y Robert Ascher [1]. Cabe destacar que el *main cord* también es conocido como *primary cord*².

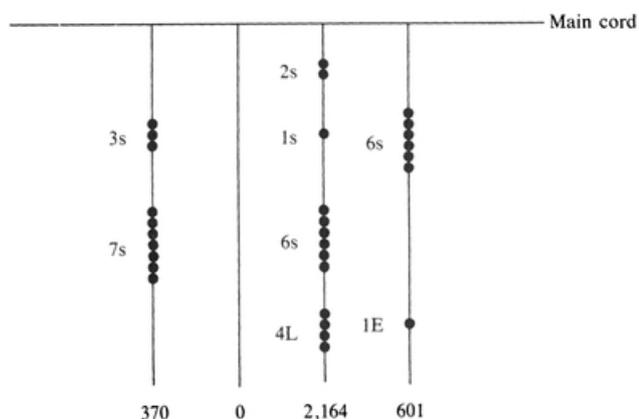


Figura 3. Representación numérica en los quipus canónicos

Fuente: [1].

En cuanto al uso pedagógico del quipu, se puede mencionar la publicación de Denise Pozzi-Escot y Rommel Ángeles Falcón, *Los quipus del museo de sitio de Pachacamac como instrumento pedagógico* [14]. En este trabajo, se describe un taller diseñado para estudiantes de nivel inicial, primario y secundario, que explora el uso del quipu y sus significados. La metodología de enseñanza propuesta busca difundir los conocimientos básicos del quipu entre los escolares, basándose en el enfoque de «aprender haciendo», que combina actividades lúdicas con el proceso de aprendizaje. Además, se adecúa la información según la edad, los niveles de psicomotricidad y el conocimiento de los estudiantes.

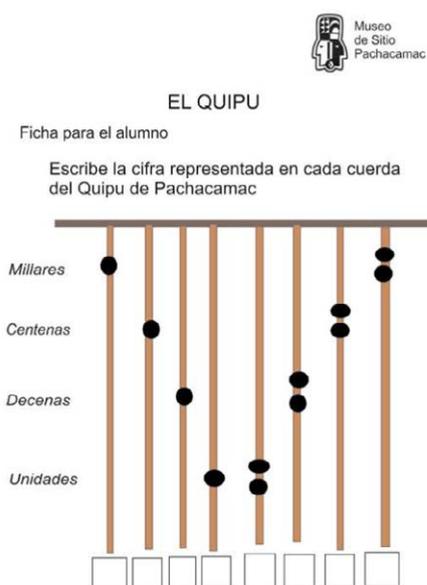


Figura 4. Fichas para el alumno de secundaria. Taller de quipus del MSPACH

Fuente: [15].

2 1E siempre se usa para representar el número 1 en la posición de las unidades, en otras posiciones el número 1 es presentado por 1s.

Un proyecto pedagógico personal consistió en utilizar el quipu como herramienta para incentivar el interés de los estudiantes en aprender a programar utilizando el lenguaje Python. Este proyecto se llevó a cabo durante la Semana de Proyectos del Colegio Alexander von Humboldt (Lima, Perú) del 9 al 12 de mayo de 2024. El tema fue «Programando quipus: explorando la historia inca a través de cuerdas y nudos con el apoyo del lenguaje Python» [8]³.

En cuanto al desarrollo de aplicaciones de *software* para simular un quipu, se puede mencionar el proyecto *Quipucamayoc* [14], desarrollado por el usuario potatodax, que cuenta con una licencia GPL-3.0. Esta aplicación permite simular un quipu en un entorno de desarrollo de Jupyter Notebook, generando como resultado la representación de un quipu canónico, como se muestra en la figura 5.

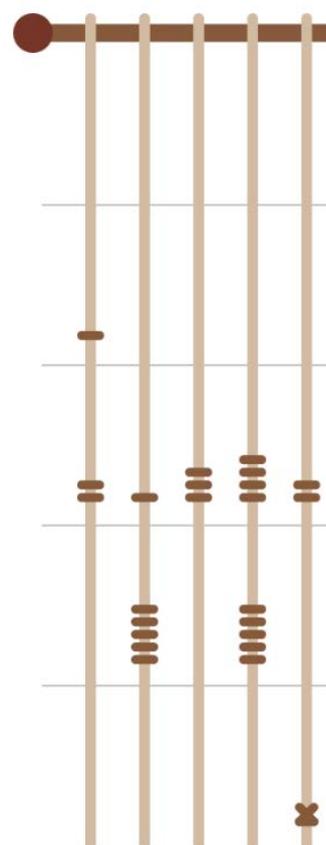


Figura 5. Simulación de un quipu

Fuente: [15].

Problema

Aprender a programar requiere dedicación y motivación [20]. Uno de los principales desafíos en este proceso es desarrollar la habilidad para resolver problemas y tener un conocimiento adecuado de matemáticas. Además, es crucial mantener la motivación y el compromiso de los estudiantes, así como encontrar métodos y herramientas apropiados para la enseñanza en las instituciones educativas [13].

3 Durante la semana de proyecto se confeccionó quipus con drizas de diferentes colores y se practicó los diferentes nudos según la notación de los Ascher.

Propuesta

El estudio se centra en proponer un enfoque innovador para la enseñanza de la programación mediante la creación de una biblioteca de Python, que será publicada en el repositorio público del lenguaje de programación Python (PyPI). Esta biblioteca permitirá crear un quipu canónico con las funcionalidades del cordón superior del quipu (*top cord*) y se podrá ejecutar como una aplicación de escritorio, extendiendo así las funcionalidades del proyecto *Quipucamayoc* [14].

Objetivos

El objetivo es incentivar a los estudiantes de educación secundaria o de los primeros años de carreras relacionadas con el ámbito digital a aprender un lenguaje de programación como Python, al mismo tiempo que se promueve la valoración del legado cultural de una herramienta ancestral de almacenamiento de datos como es el quipu.

FUNDAMENTOS

Se presentan los conceptos empleados en el estudio:

- **Quipu:** El término *quipu* proviene del quechua y significa 'nudo'. Según lo describieron los cronistas españoles del siglo XVI y lo muestran los ejemplares existentes en museos arqueológicos, consiste en una serie de cuerdas verticales o colgantes, suspendidas de una cuerda horizontal o principal. A veces, se añadían cuerdas subsidiarias, de manera similar a las ramas de un arroyo que se unen a las cuerdas colgantes. Los nudos que representaban números se ataban en las cuerdas colgantes, subsidiarias y, en ocasiones, en la cuerda principal [4]. En la figura 1 se presenta el esquema de un quipu. Otra definición describe al quipu como un antiguo instrumento andino de registro de información, universalmente asociado con los incas, quienes lo utilizaron para llevar la contabilidad administrativa de su vasto imperio multiétnico y para conservar y transmitir la memoria de sus historias dinásticas [2].
- **Python:** Python es un lenguaje de programación de alto nivel, interpretado y de propósito general, conocido por su sintaxis sencilla y su legibilidad. Soporta múltiples paradigmas de programación y es ampliamente utilizado en áreas como el desarrollo web, el análisis de datos y la inteligencia artificial [16].
- **Paquete en Python:** Un paquete es un módulo que puede contener submódulos o, recursivamente, subpaquetes. Técnicamente, un paquete es un módulo de Python con un atributo `'__path__'` que indica dónde localizar submódulos y subpaquetes adicionales dentro del paquete [17]. Cabe señalar que en Python los términos «paquete» y «librería» se usan indistintamente.

- **Módulo en Python:** Un módulo es un objeto que sirve como unidad de organización del código en Python. Los módulos tienen espacios de nombres que contienen objetos Python arbitrarios y se cargan en Python a través del proceso de importación [18].
- **PyPI:** El Python Package Index (PyPI) es un repositorio de *software* para el lenguaje de programación Python. PyPI facilita la búsqueda e instalación de *software* desarrollado y compartido por la comunidad de Python. Los propietarios de paquetes lo usan para distribuir su *software* [19].
- **Control de versiones:** El control de versiones es un sistema que registra los cambios en un archivo o conjunto de archivos a lo largo del tiempo, permitiendo recuperar versiones específicas. Existen varias implementaciones de Git, entre las más destacadas están GitHub y GitLab [3].
- **Turtle graphics:** Es una implementación de las populares herramientas de dibujo geométrico introducidas por Logo, desarrolladas por Wally Feurzeig, Seymour Papert y Cynthia Solomon en 1967. En Python, Turtle graphics representa una «tortuga» física (un pequeño robot con un bolígrafo) que dibuja en una hoja de papel en el suelo. Es una forma efectiva y comprobada para que los estudiantes comprendan conceptos de programación e interactúen con el *software*, ya que proporciona retroalimentación instantánea y visible. También ofrece un acceso conveniente a la salida gráfica en general. El dibujo de tortugas se creó originalmente como una herramienta educativa para ser utilizada por profesores en el aula. Para el programador que necesita generar algún resultado gráfico, puede ser una solución sin la complejidad de introducir bibliotecas externas o más avanzadas en su trabajo [5].
- **Gráficos vectoriales escalables (SVG):** Los gráficos vectoriales escalables (del inglés Scalable Vector Graphics) son una aplicación de XML que permite representar información gráfica de forma compacta y portátil. El interés en SVG está creciendo rápidamente. La mayoría de los navegadores web modernos pueden mostrar gráficos SVG, y la mayoría de los programas de *software* de dibujo vectorial pueden exportarlos [6].

METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología en cascada para el desarrollo del proyecto de la biblioteca de Quipu. En la figura 6 se muestra el diagrama de Gantt del proyecto.

	📌	Name	Duration	Start	Finish	Predecessors
1		📌 Proyecto librería Quipudigital	48 days	4/29/24 8:00 AM	7/3/24 5:00 PM	
2		📌 Antecedentes	10 days	4/29/24 8:00 AM	5/10/24 5:00 PM	
3	📅	Participación en Semana de Proyectos del Colegio Alexander	10 days	4/29/24 8:00 AM	5/10/24 5:00 PM	
4		📌 Requerimientos	10 days	5/13/24 8:00 AM	5/24/24 5:00 PM	2
5	📅	Revisión de la documentación	5 days	5/13/24 8:00 AM	5/17/24 5:00 PM	
6	📅	Elaboración de SRS	5 days	5/20/24 8:00 AM	5/24/24 5:00 PM	5
7		📌 Análisis y Diseño	4 days	5/24/24 5:00 PM	5/30/24 5:00 PM	4
8	📅	Arquitectura de la solución	1 day	5/24/24 5:00 PM	5/27/24 5:00 PM	
9	📅	Diseño de imágenes de Quipu	2 days	5/27/24 5:00 PM	5/29/24 5:00 PM	8
10	📅	Diagrama de clases	1 day	5/29/24 5:00 PM	5/30/24 5:00 PM	9
11		📌 Implementación	5 days	5/30/24 5:00 PM	6/6/24 5:00 PM	7
12	📅	Desarrollo de la librería Quipudigital	5 days	5/30/24 5:00 PM	6/6/24 5:00 PM	
13	📅	Pruebas	3 days	6/6/24 5:00 PM	6/11/24 5:00 PM	
14		📌 Implantación	17 days	6/11/24 8:00 AM	7/3/24 5:00 PM	12
15	📅	Despliegue de la librería Quipudigital	2 days	6/11/24 8:00 AM	6/12/24 5:00 PM	
16	📅	Encuesta aplicadas a la librería Quipudigital	8 days	6/17/24 8:00 AM	6/26/24 5:00 PM	15
17	📅	Análisis del resultado de las encuestas	3 days	6/28/24 5:00 PM	7/3/24 5:00 PM	16

Figura 6. Diagrama de Gantt

Fuente: Elaboración propia.

A. Antecedentes

Del 9 al 12 de mayo de 2024, se participó en la Semana de Proyectos del Colegio Alexander von Humboldt (Lima, Perú), donde se presentó el proyecto «Programando quipus: explorando la historia inca a través de cuerdas y nudos con el apoyo del lenguaje Python». De manera empírica, se identificó el interés de los estudiantes en la programación mediante el uso de herramientas ancestrales de almacenamiento de datos, como el quipu.

B. Requerimientos

Se planteó la necesidad de implementar una biblioteca pública para dibujar quipus en aplicaciones de escritorio con Python, con

el objetivo de generar interés en los estudiantes por el aprendizaje de un lenguaje de programación a través de una herramienta ancestral de contabilidad como el quipu. Se evaluaron proyectos similares y se decidió utilizar como punto de partida el proyecto Quipucamayoc [15]. Se añadieron funcionalidades para dibujar el cordón superior del quipu y permitir su visualización en aplicaciones de escritorio. La biblioteca se publicó en la plataforma PyPI, utilizando la versión 3.9.13 de Python⁴.

C. Análisis y diseño

En la figura 7 se muestran las imágenes de los dígitos numéricos que se utilizarán en los cordones superiores⁵ del quipu, empleando la notación de los Ascher.

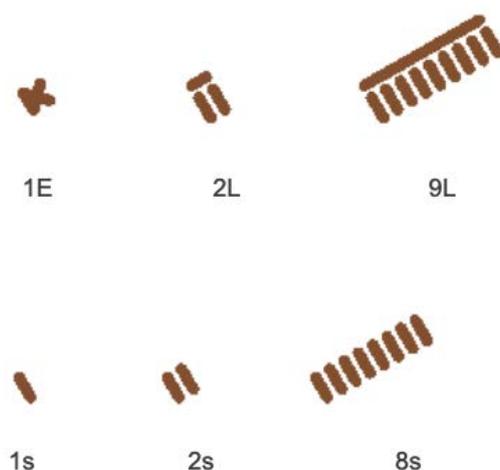


Figura 7. Simbología gráfica aplicada para la numeración digital según Marcia Ascher y Robert Ascher para el cordón superior del quipu

Fuente: Elaboración propia.

4 Se pueden usar versiones más actuales de Python, pero a la fecha de la publicación esa fue la versión de Python empleada.

5 Los cordones superiores usualmente se usan para registrar la suma-toria de los valores numéricos de los cordones colgantes.

En la figura 8, se muestra el diagrama de UML de la clase principal de la librería de Quipu.

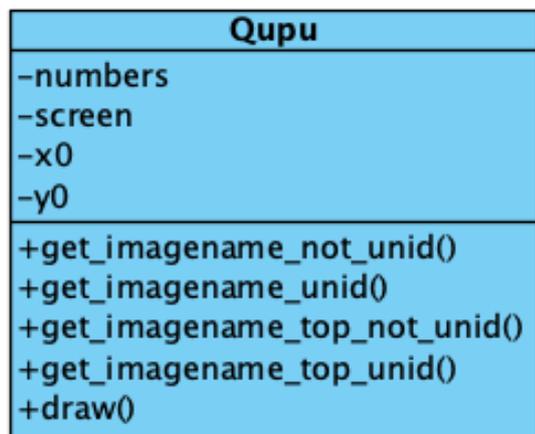


Figura 8. Diagrama de clases

Fuente: Elaboración propia.

D. Implementación

Para la implementación de la solución se usó como entorno de desarrollo el programa Visual Studio Code⁶. En la figura 9, se aprecia la estructura de archivos y carpetas de la librería de Quipu.

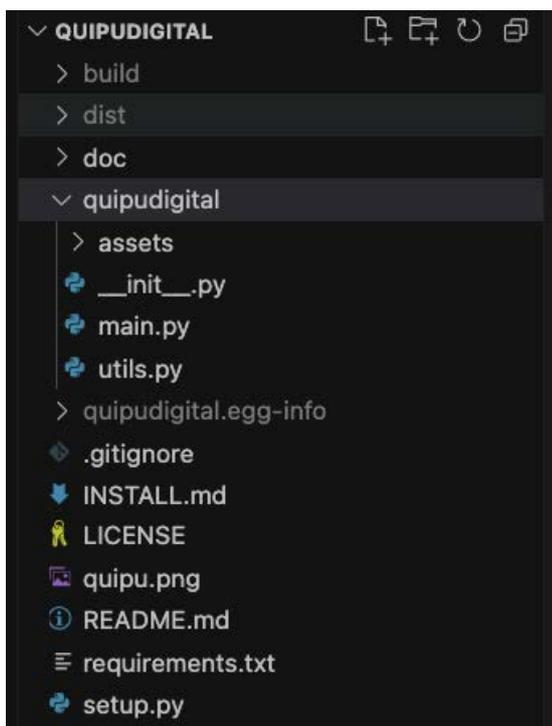


Figura 9. Estructura del proyecto

Fuente: Elaboración propia.

E. Pruebas

La biblioteca generada se denominó QuipuDigital y su forma de uso se detalla en la figura 10. En la figura 11 se muestra la salida gráfica generada por la librería⁷.

```
import quipudigital.main as qd

numbers = [1000, 2024, 1234, 5234, 120, 1000]

quipu = qd.Quipu(numbers, x0=-300, y0=110)

quipu.screen.setup(width=0.59, height=0.99)

quipu.draw()
```

Figura 10. Código en Python para usar la librería QuipuDigital

Fuente: Elaboración propia.

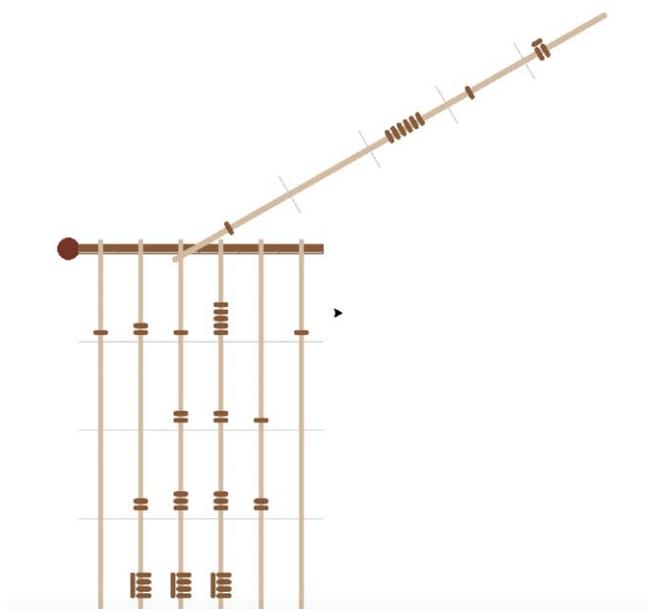


Figura 11. Dibujo generado por la librería del Quipu

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 12, se detalla la relación entre los cordones secundarios y el cordón superior para un mejor entendimiento de la librería QuipuDigital.

⁶ Se pueden emplear otros entornos de desarrollo de Python como PyCharm.

⁷ La aplicación se ejecuta como una aplicación de escritorio, no es una aplicación que se ejecute en Jupyter Notebook.

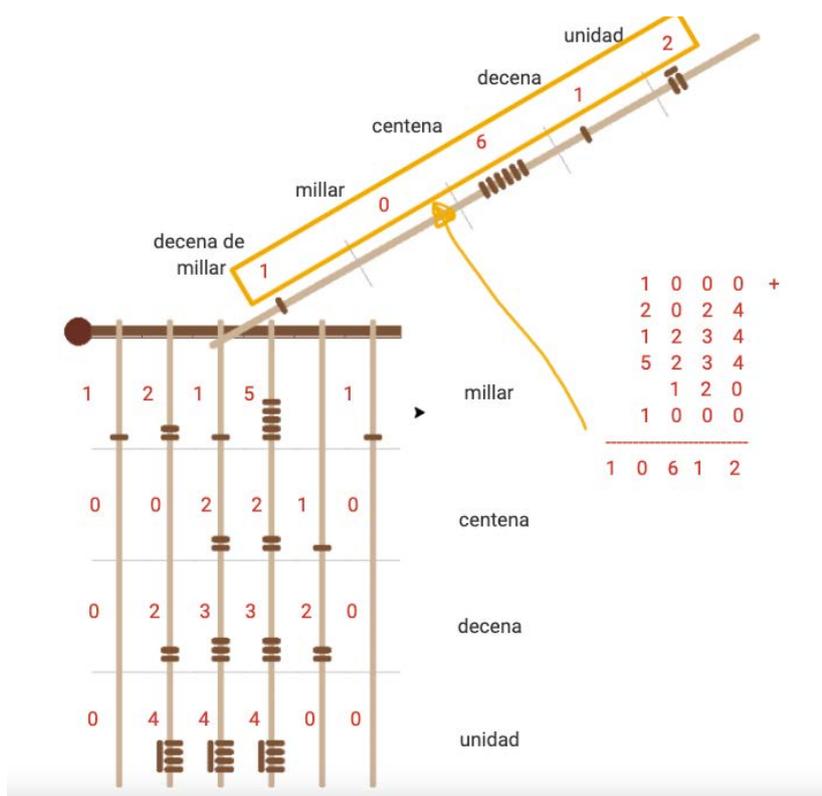


Figura 12. Detalle de la relación de los valores de los cordones secundarios y superior del quipu generado por la librería QuipuDigital
Fuente: Elaboración propia.

F. Implantación

Después de realizar las pruebas de la librería de QuipuDigital, se procede con la publicación de la librería en la plataforma de PyPi [19]⁸.

RESULTADOS

El objetivo de este estudio es incentivar a los estudiantes de educación secundaria o de los primeros años de carreras relacionadas con el ámbito digital a aprender un lenguaje de programación como Python, mientras se promueve la valoración del legado cultural de una herramienta ancestral de almacenamiento de datos como el quipu. Por ello, se plantea la siguiente prueba de hipótesis.

- **Hipótesis nula (H0):** No existe una relación entre el aumento del interés en la programación y la recomendación del uso de la biblioteca QuipuDigital.
- **Hipótesis alternativa (H1):** Existe una relación entre el aumento del interés en la programación y la recomendación del uso de la biblioteca QuipuDigital.

Para realizar la prueba de hipótesis, se diseñó una encuesta aplicada a una muestra de 64 estudiantes del primer ciclo de la carrera de Diseño y Desarrollo de Software en Tecsup durante el semestre 2024-1. En la tabla 1, se presenta la primera pregunta de la encuesta, donde se observa que el 53,12 % de los estudiantes muestran interés en el uso de la biblioteca QuipuDigital. Por otro lado, en la tabla 2 se muestran los resultados de la segunda pregunta, que reflejan que el 46,97 % de los estudiantes recomendaría el empleo de la biblioteca QuipuDigital.

Tabla 1
Frecuencia y porcentaje de la primera pregunta de la encuesta

¿Crees que QuipuDigital ha aumentado tu interés en la programación?	Frecuencia	Porcentaje
No	3	4,69 %
No estoy seguro/a	6	9,38 %
Sí, un poco	21	32,81 %
Sí, significativamente'	34	53,12 %

Nota. Se puede apreciar que la mayor cantidad de encuestados Si cree significativamente que la biblioteca QuipuDigital ha aumentado su interés en la programación.

Fuente: Elaboración propia.

⁸ Para la fecha de la publicación del paper la versión disponible era la 0.1.5.

Tabla 2
Frecuencia y porcentaje de la segunda pregunta de la encuesta

¿Recomendarías QuipuDigital a otros estudiantes o colegas interesados en la programación?	Frecuencia	Porcentaje
Definitivamente no	0	0,00 %
Probablemente no	0	0,00 %
No estoy seguro/a	8	12,50 %
Probablemente sí	26	40,63 %
Definitivamente sí	30	46,87 %

Nota. Se puede apreciar que la mayor cantidad de encuestados Definitivamente sí recomendaría el uso de la biblioteca QuipuDigital a otros programadores.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que tenemos dos variables categóricas y ordinales, y no podemos asumir que los datos siguen una distribución normal, se aplicó la prueba de correlación de Spearman. El coeficiente de correlación de Spearman obtenido fue de 0,50916, con un p-valor de 0,000017351, lo que nos permite concluir que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Es decir, hay una relación entre el interés en la programación debido al uso de la biblioteca QuipuDigital y la recomendación de su uso.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de las pruebas estadísticas, se puede concluir que la utilización de bibliotecas como QuipuDigital aumenta el interés de los estudiantes por la programación. Este interés podría incrementarse a medida que se agreguen nuevas funcionalidades a la biblioteca QuipuDigital. Así, se revaloriza el quipu no solo como una herramienta ancestral, sino como un recurso actual que ayuda a los estudiantes en el aprendizaje de un lenguaje de programación como Python.

Cabe mencionar que la biblioteca QuipuDigital ha extendido las funcionalidades del proyecto *Quipucamayoc* [14], añadiendo características como el uso del cordón superior en el quipu. El código fuente de la biblioteca QuipuDigital ha sido publicado con licencia GPL-3.0 en la plataforma GitHub y desplegado en PyPI, para que pueda ser utilizado como una biblioteca pública por la comunidad de desarrolladores [7].

REFERENCIAS

[1] Ascher, M. & Ascher, R. (1997). *Mathematics of the Incas: Code of the Quipu*. Dover Publications.

[2] Curatola, M. & De la Puente Luna, J.(2013). *El quipu colonial. Estudios y materiales*. Fondo Editorial PUCP.

[3] Chacon, S. & Straub, B. (2005). *Pro Git* (2.^a ed.). Apress

[4] Day, C. (1967). *Quipus and Witches' Knots*, The role of the knot in primitive and ancient cultures. The University of Kansas Press.

[5] Documentación de Python (2024). *Turtle - Turtle graphics*. <https://docs.python.org/3/library/turtle.html>

[6] Eisenberg, D. & Bellamy-Royds, A. (2024). *SVG essentials: [producing scalable vector graphics with XML]*.

[7] Gómez Marín, J. (2024a). *Project PyPi: Una biblioteca de visualización de Quipus con Python*. <https://pypi.org/project/quipudigital/>

[8] Gómez Marín, J. (2024b). *Project GitHub: Programando Quipus: Explorando la Historia Inca a través de cuerdas y nudos con el apoyo del lenguaje Python*. <https://github.com/jgomezz/quipus>

[9] Gresham College. (9 de noviembre de 2021). *Knot Just Numbers: Andean Khipu Strings* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=A15Qq-EDk_k

[10] Lopez, P. (2020). *Khipus: Mucho más que el sistema contable de los incas*. BBVA. <https://www.bbva.com/es/pe/khipus-mucho-mas-que-el-sistema-contable-de-los-incas/>

[11] Medrano, M. (2022). *Quipus. Mil años de historia anudada en los Andes y su futuro digital*. Planeta.

[12] Pereyra, S. H. (1996). *Acerca de dos quipus con características numéricas excepcionales*. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 25(2), 187-202.

[13] Pessoa Medeiros, R., Lisboa Ramalho, G. & Pontual Falcao, T. (2019). *A systematic literature review on teaching and learning introductory programming in higher education*. *IEEE Transactions on Education*, 62(2), 77-90. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2864133>

[14] Potatodax. (2022). *Project GitHub: Quipucamayoc: A high-level quipu visualization library for Python*. GitHub. <https://github.com/potatodax/quipucamayoc>

[15] Pozzi-Escot, D. & Ángeles Falcón, R. (2009). *Sistemas de Notación Inca: Quipu y Tocapu*. En *Acta del Simposio Internacional. Los quipus del museo de sitio de Pachacamac como instrumento pedagógico* (pp. 200-227). Lima, 15-17 de enero de 2009. Ministerio de Cultura del Perú.

[16] Python Software Foundation. (2022). *Python* (versión 3.9.13) [Software]. <https://www.python.org>

[17] Python Software Foundation - Package. (2024a). *Python Documentation Glossary*. <https://docs.python.org/3/glossary.html#term-package>

[18] Python Software Foundation. - Module (2024b). *Python Documentation Glossary*. <https://docs.python.org/3/glossary.html#term-module>

[19] The Python Package Index (PyPI). (2024). *Main page* <https://pypi.org/>

[20] Watanabe, Y., Otake, Y., Yoshitomi, K., Takahashi, H. & Kohiyana, K. (2001). *The Effects of Scaffolding-Based Courseware for The Scratch Programming Learning on Student Problem Solving Skill*. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 47(3), 405-411.

ACERCA DEL AUTOR

Jaime Gómez Marín

Coordinador de la carrera de Diseño y Desarrollo de Software de Tecsup, ingeniero electrónico por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Técnico en Electrónica de Sistemas Computarizados por el Instituto Tecsup, con estudios concluidos en la maestría de Estadística Aplicada por la Universidad Nacional Agraria la Molina (Unalm) y tiene un Micromaster en Statistics and Data Science por el MIT Institute for Data, Systems, and Society (IDSS).

 jgomezm@tecsup.edu.pe

 jgomezz@gmail.com

Recibido: 13-05-24
Revisado: 14-08-24
Aceptado: 23-08-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Impacto de la realidad extendida
en el proceso de
enseñanza-aprendizaje
en disciplinas como la
ingeniería, la tecnología
y ciencias aplicadas.



Desafíos de la realidad extendida en la educación técnica: una revisión sistemática

Challenges of Extended Reality in Technical Education: A Systematic Review

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo identificar los principales desafíos y beneficios de la implementación de la realidad extendida (XR), que incluye la realidad aumentada (AR), la realidad virtual (VR) y la realidad mixta (MR), en la educación técnica en disciplinas como ingeniería, tecnología y ciencias aplicadas. A través de una revisión sistemática de la literatura, se han analizado las barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales que dificultan la integración efectiva de XR en los currículos educativos. La metodología empleada sigue un enfoque PRISMA, con la búsqueda de artículos relevantes en la base de datos Scopus, utilizando una combinación de palabras clave relacionadas con XR y educación técnica. Se seleccionaron 43 estudios que cumplieran con los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Los resultados principales indican que la XR puede mejorar significativamente la retención de conocimientos, la comprensión de conceptos complejos y la motivación estudiantil. Sin embargo, la implementación de XR enfrenta importantes desafíos, como la necesidad de equipos especializados, la capacitación de los docentes y los altos costos asociados. Adicionalmente, se identificaron problemas vinculados a la resistencia al cambio y la falta de políticas institucionales claras para la adopción de estas tecnologías. Las conclusiones destacan la necesidad de invertir en infraestructura tecnológica y formación continua para los educadores, así como desarrollar políticas de apoyo que faciliten la integración de XR en la educación técnica. Superar estas barreras permitirá aprovechar al máximo el potencial de XR para mejorar la calidad y eficacia de la enseñanza en disciplinas técnicas avanzadas como la ingeniería, la tecnología y las ciencias aplicadas.

ABSTRACT

The present study aims to identify the main challenges and benefits of implementing Extended Reality (XR), which includes Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), and Mixed Reality (MR), in technical education within disciplines such as engineering, technology, and applied sciences. Through a systematic literature review, technological, pedagogical, and institutional barriers that hinder the effective integration of XR into educational curricula have been analyzed. The methodology employed follows a PRISMA approach, with the search for relevant articles conducted in the Scopus database, using a combination of keywords related to XR and technical education. A total of 43 studies that met the predefined inclusion and exclusion criteria were selected. The main findings indicate that XR can significantly enhance knowledge retention, the understanding of complex concepts, and student motivation. However, the implementation of XR faces significant challenges, such as the need for specialized equipment, teacher training, and the associated high costs. Additionally, issues related to resistance to change and the lack of clear institutional policies for adopting these technologies were identified. The conclusions highlight the need to invest in technological infrastructure and continuous training for educators, as well as to develop supportive policies that facilitate the integration of XR in technical education. Overcoming these barriers will allow for the full potential of XR to be realized, improving the quality and effectiveness of teaching in advanced technical disciplines such as engineering, technology, and applied sciences.



Palabras Claves

Realidad extendida (XR), realidad aumentada (AR), realidad virtual (VR), realidad mixta (MR), educación especializada, tecnologías de la información y la comunicación (TIC), innovación pedagógica.

Key words

Extended Reality (XR), Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), Mixed Reality (MR), Specialized Education, Information and Communication Technologies (ICT), Pedagogical Innovation.

INTRODUCCIÓN

En la última década, las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han transformado significativamente la educación, y la realidad extendida (XR) ha emergido como una herramienta innovadora. XR, que abarca la realidad aumentada (AR), la realidad virtual (VR) y la realidad mixta (MR), está redefiniendo los métodos de enseñanza y aprendizaje en la educación técnica, especialmente en áreas como la ingeniería, la tecnología y las ciencias aplicadas. Estas tecnologías ofrecen experiencias inmersivas que facilitan la comprensión de conceptos complejos y el desarrollo de habilidades técnicas avanzadas [1].

La integración de XR en los currículos educativos no ha sido un camino sencillo. Las instituciones educativas se enfrentan a barreras tecnológicas significativas, como la necesidad de equipos especializados y problemas de compatibilidad de *software* y *hardware* [2]. Además, los costos asociados con la implementación y el mantenimiento de estas tecnologías pueden ser prohibitivos, especialmente para instituciones con recursos limitados [3]. A esto se suma la necesidad de capacitar adecuadamente a los docentes, lo cual requiere un esfuerzo considerable en términos de tiempo y recursos [4].

El entusiasmo por las aplicaciones de XR en la educación es evidente, aunque aún existe una brecha considerable entre su potencial y su implementación práctica. Diversas investigaciones han demostrado que XR puede mejorar significativamente el rendimiento académico y aumentar el compromiso de los estudiantes, especialmente en áreas como la medicina y la ingeniería [5]. Sin embargo, es fundamental evaluar críticamente cómo estas tecnologías pueden integrarse eficazmente en los programas educativos para maximizar su impacto [7].

Este estudio tiene como objetivo principal identificar y analizar los desafíos y beneficios de la implementación de XR en la educación técnica. Además, busca reconocer las barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales que dificultan su adopción y proponer estrategias para una integración más efectiva en los currículos educativos [8]. Estos objetivos se justifican por la necesidad de ofrecer una base sólida que permita a las instituciones educativas y a los responsables de políticas desarrollar enfoques más efectivos y sostenibles para la adopción de XR.

El análisis de estos aspectos es relevante no solo para académicos e investigadores, sino también para educadores, administradores y responsables de políticas educativas que buscan maximizar las oportunidades que la realidad extendida ofrece para mejorar la calidad y eficacia de la educación en disciplinas técnicas avanzadas [9]. La exploración de las prácticas actuales y las áreas de mejora, a través de una revisión sistemática de la literatura, proporcionará una visión comprensiva y recomendaciones prácticas valiosas para futuras investigaciones y aplicaciones en el ámbito educativo [10].

FUNDAMENTOS

Realidad extendida (XR)

La realidad extendida (XR) es un término general que abarca tecnologías inmersivas como la realidad aumentada (AR), la realidad virtual (VR) y la realidad mixta (MR). Estas tecnologías han demostrado ser herramientas poderosas en el ámbito educativo, ofreciendo nuevas formas de interacción y aprendizaje. Por ejemplo, en la educación técnica y de diseño, XR permite a los estudiantes no solo visualizar conceptos complejos, sino también interactuar con ellos de manera más efectiva [1]. Además, XR facilita la comprensión de ideas complejas al permitir explorar objetos virtuales en tres dimensiones, mejorando así la retención de conocimientos [15].

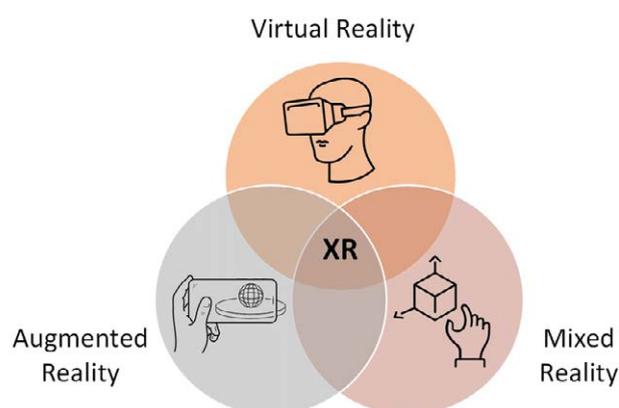


Figura 1. Tecnologías de realidad extendida (XR)

Fuente: [12].

Realidad aumentada (AR)

La realidad aumentada (AR) superpone información digital sobre el mundo real, proporcionando una capa adicional de datos interactivos en tiempo real. En el ámbito educativo, AR ha demostrado ser eficaz para mejorar el aprendizaje colaborativo y la retención de conocimientos [7], permitiendo a los estudiantes visualizar modelos 3D complejos, como se muestra en la figura a, lo que facilita la comprensión de conceptos abstractos [23].

Además, AR tiene aplicaciones prácticas en diversos campos. En turismo, por ejemplo, se utiliza para superponer información relevante sobre puntos de interés en la pantalla del usuario, mejorando la experiencia de exploración urbana (figura b). También es útil en la traducción de texto en tiempo real (figura c), permitiendo a los usuarios comprender rápidamente señales en otros idiomas. En el ámbito técnico, AR guía a los técnicos durante el mantenimiento automotriz (figura d), superponiendo información crítica sobre las piezas del motor, lo que optimiza la precisión y eficiencia de las reparaciones.



Figura 2. Aplicaciones típicas que utilizan tecnología de realidad aumentada: (a) educación; (b) herramienta auxiliar; (c) traducción de idiomas; (d) ensamble en manufactura

Fuente: [18].

Realidad virtual (VR)

La realidad virtual (VR) sumerge a los usuarios en entornos completamente virtuales, eliminando cualquier percepción del mundo real. En el ámbito educativo, VR ha demostrado ser especialmente eficaz para recrear escenarios difíciles de replicar en un aula tradicional, como simulaciones de procedimientos quirúrgicos o la construcción de puentes en ingeniería [5]. Esta tecnología permite a los estudiantes practicar habilidades complejas en un entorno seguro y controlado, lo que aumenta su confianza y precisión en el desempeño [23].

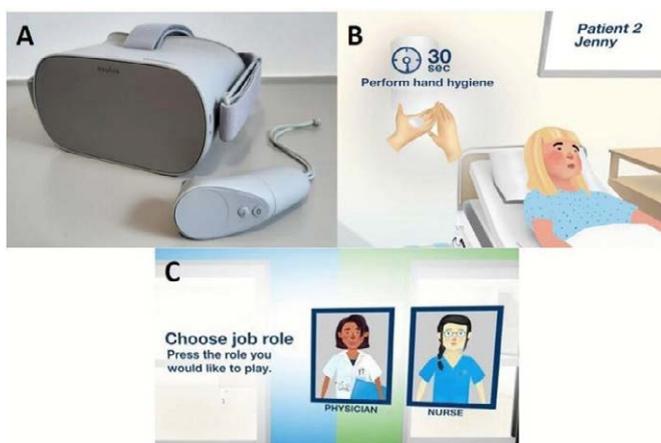


Figura 3. Entrenamiento en realidad virtual, hardware y software. A: Visor y controlador Oculus Go; B: Captura de pantalla durante la lección; cortesía de Essity. C: Selección de profesión; cortesía de Essity.

Fuente: [6].

Realidad mixta (MR)

La realidad mixta (MR) integra elementos del mundo real con virtuales, permitiendo interacciones entre ambos en tiempo real. Esta tecnología es especialmente útil en disciplinas que requieren la manipulación simultánea de objetos reales y virtuales. En el ámbito de la formación técnica, MR se ha utilizado para entrenar a estudiantes en mantenimiento industrial, donde pueden interactuar con equipos reales mientras reciben guías digitales superpuestas que les orientan en los procedimientos de reparación [3].

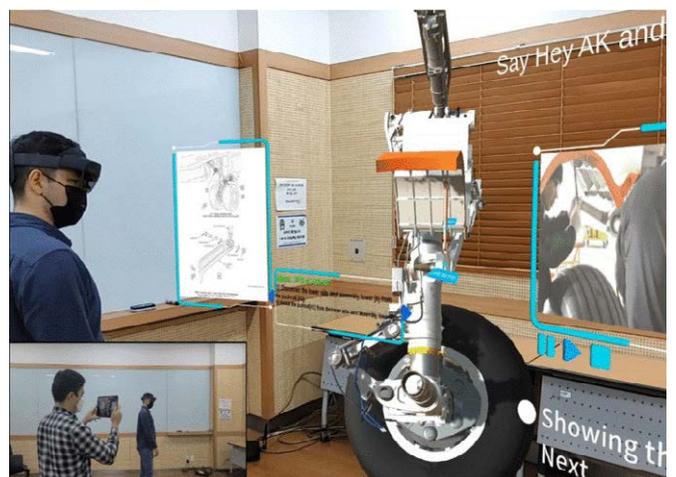


Figura 4. Educación en mantenimiento basada en realidad mixta para la remoción del tren de aterrizaje de un Boeing 737, capturada con Spectator View, que permite visualizar contenido de realidad mixta de HoloLens desde dispositivos secundarios.

Fuente: [25].

Diferencias entre AR, VR y MR

Aunque AR, VR y MR son componentes de XR, cada uno ofrece diferentes niveles de inmersión y tipos de interacción. AR añade elementos digitales al entorno real, VR crea un entorno completamente virtual, y MR combina ambos mundos permitiendo

interacciones más complejas. Estas diferencias son cruciales para seleccionar la tecnología adecuada según las necesidades educativas específicas. Por ejemplo, AR puede ser más útil para mejorar materiales de estudio existentes, mientras que VR puede ser más adecuado para simulaciones completas y MR para aplicaciones que requieren interacción con el mundo físico [29].

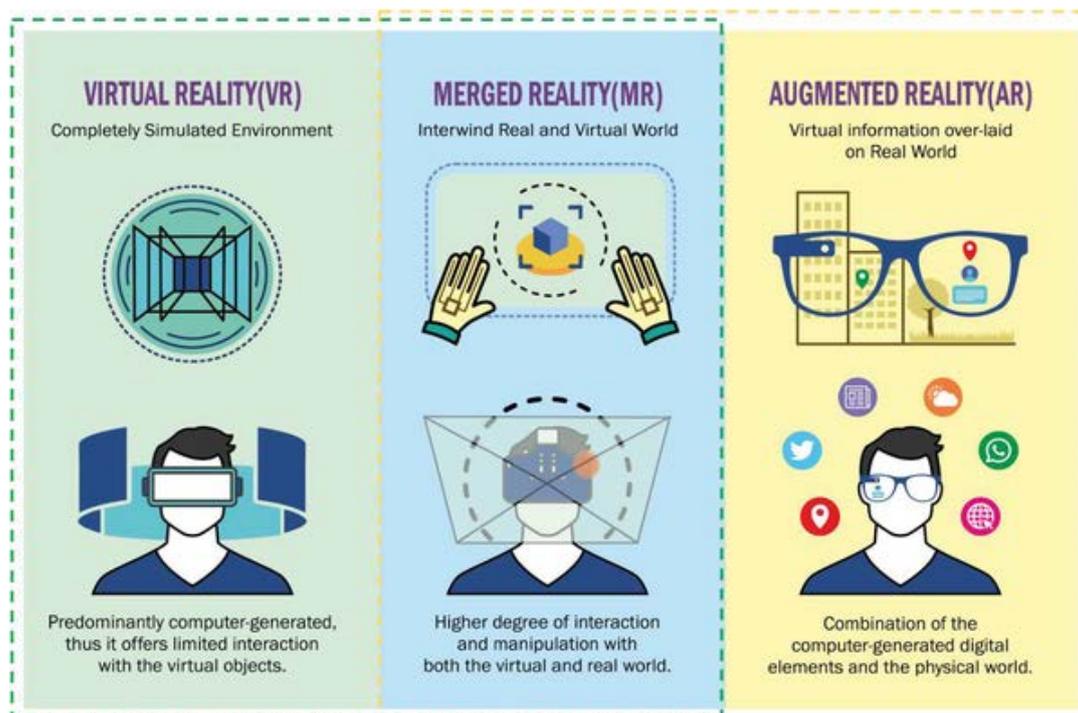


Figura 5. Ilustración esquemática de realidad virtual, realidad aumentada y realidad mixta.

Fuente: [21].

STEM

Las disciplinas STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas) son clave para desarrollar competencias técnicas avanzadas. La educación en STEM impulsa el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la innovación. La incorporación de tecnologías XR en estas áreas facilita una comprensión más profunda y práctica de los conceptos, desde experimentos científicos virtuales hasta proyectos de ingeniería interactivos [20].

Educación técnica

La educación técnica se enfoca en enseñar habilidades prácticas y aplicadas, directamente relevantes para el mercado laboral. Las tecnologías XR pueden mejorar significativamente esta formación al ofrecer entornos de aprendizaje interactivos y simulados, donde los estudiantes practican y perfeccionan sus habilidades sin los riesgos asociados a la capacitación en entornos reales [1].

Habilidades técnicas

Las habilidades técnicas son competencias específicas y prácticas necesarias en diversas profesiones. Estas incluyen desde el conocimiento de herramientas y tecnologías concretas hasta la aplicación de teorías científicas en situaciones prácticas. Las tecnologías XR desempeñan un papel crucial en el desarrollo de estas habilidades, al permitir prácticas repetitivas y retroalimentación inmediata en un entorno controlado [15].

METODOLOGÍA

La investigación se estructuró como una búsqueda sistemática de literatura, comenzando con la formulación de una pregunta basada en el modelo PICO para orientar eficazmente la recopilación de información pertinente. Para asegurar la calidad y relevancia de los datos obtenidos, se eligió Scopus como la plataforma principal para la revisión de la literatura. La formulación de la pregunta PICO precedió la búsqueda, facilitando la identificación y selección precisa de estudios que abordan la temática central de esta investigación:

Tabla 1
Componentes de la pregunta PICO

Componente	Indica	Respuesta
P	Educadores y programas académicos en disciplinas especializadas que incorporan tecnologías XR	"Higher education", "engineering education", "medical education", "science education", "technical education", "professional training"
I	Enfoques de enseñanza que involucran Realidad Extendida.	"Virtual Reality", "Augmented Reality", "Mixed Reality", "XR", "pedagogical strategies", "educational innovation"
C	Evaluación de XR frente a métodos tradicionales o convencionales	"Evaluation", "comparative analysis", "effectiveness comparison"
O	Desafíos y resultados del uso de XR en la educación	"Challenges", "Integration challenges", "implementation challenges", "barriers", "obstacles", "effectiveness in education", "educational impact", "learning outcomes"

Fuente: Elaboración propia.

Se formuló la siguiente pregunta de investigación para orientar este estudio: «¿Cuáles son los desafíos identificados al integrar la realidad extendida en la educación especializada en disciplinas como medicina, ingeniería y ciencias, en comparación con los métodos educativos tradicionales, y qué estrategias efectivas se han propuesto para superarlos?».

A partir de esta pregunta, se definieron palabras clave relevantes que permitieron construir una ecuación de búsqueda precisa, garantizando la identificación de literatura pertinente y confiable sobre el tema.

Para la revisión sistemática, se diseñó una estrategia de búsqueda detallada utilizando la base de datos Scopus. La búsqueda combinó términos clave que abarcan varios ámbitos educativos y tecnologías de realidad extendida, así como términos asociados con la evaluación y los desafíos de su implementación. La ecuación generada para la búsqueda en Scopus fue la siguiente:

TITLE-ABS-KEY ("higher education" OR "engineering education" OR "medical education" OR "science education" OR "technical education" OR "professional training") AND TITLE-ABS-KEY ("Virtual Reality" OR "Augmented Reality" OR "Mixed Reality" OR "XR" OR "pedagogical strategies" OR "educational innovation") AND TITLE-ABS-KEY ("evaluation" OR "comparative analysis" OR "effectiveness comparison" OR "traditional teaching methods" OR "non-XR educational methods" OR "conventional teaching practices") AND TITLE-ABS-KEY ("challenges" OR "integration challenges" OR "implementation challenges" OR "barriers" OR "obstacles" OR "effectiveness in education" OR "educational impact" OR "learning outcomes").

La metodología PRISMA guio la selección de artículos para este estudio mediante un enfoque riguroso basado en criterios explícitos de inclusión y exclusión. Este proceso sistemático permitió una evaluación estructurada y precisa de la literatura, asegurando la relevancia y calidad de los resultados incluidos en el análisis.

Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- CI01: Artículos que estudien la integración de tecnologías de realidad extendida en entornos educativos especializados (medicina, ingeniería y ciencias).

- CI02: Publicaciones que analicen los desafíos en la implementación de XR y las estrategias pedagógicas para superarlos.
- CI03: Estudios que informen sobre la efectividad, el impacto o los resultados de aprendizaje derivados del uso de XR en educación.
- CI04: Artículos de texto completo disponibles en bases de datos indexadas de Scopus.

Los criterios de exclusión incluyeron lo siguientes:

- CE01: Estudios que no aborden el uso de tecnologías de XR.
- CE02: Documentos publicados antes de 2018, para asegurar la relevancia actual.
- CE03: Artículos en idiomas distintos de inglés o español.
- CE04: Documentos en desarrollo y que no sean artículos de revista o revisiones.

Esta búsqueda inicial identificó 422 artículos. Tras el cribado por título y resumen, el conjunto se redujo a 367 artículos para revisión detallada. De estos, solo 150 estaban disponibles en texto completo y se evaluaron rigurosamente. Durante la revisión de elegibilidad, se descartaron 107 artículos que no cumplían los criterios de inclusión o infringían los de exclusión, centrados en la relevancia de los desafíos de implementación de XR en educación técnica y otros aspectos metodológicos esenciales. Finalmente, 43 estudios cumplieron todos los requisitos y fueron seleccionados para la revisión sistemática, proporcionando una base sólida para analizar los desafíos y estrategias de integración de XR en contextos educativos especializados. El diagrama de flujo PRISMA adjunto ilustra este proceso visualmente.

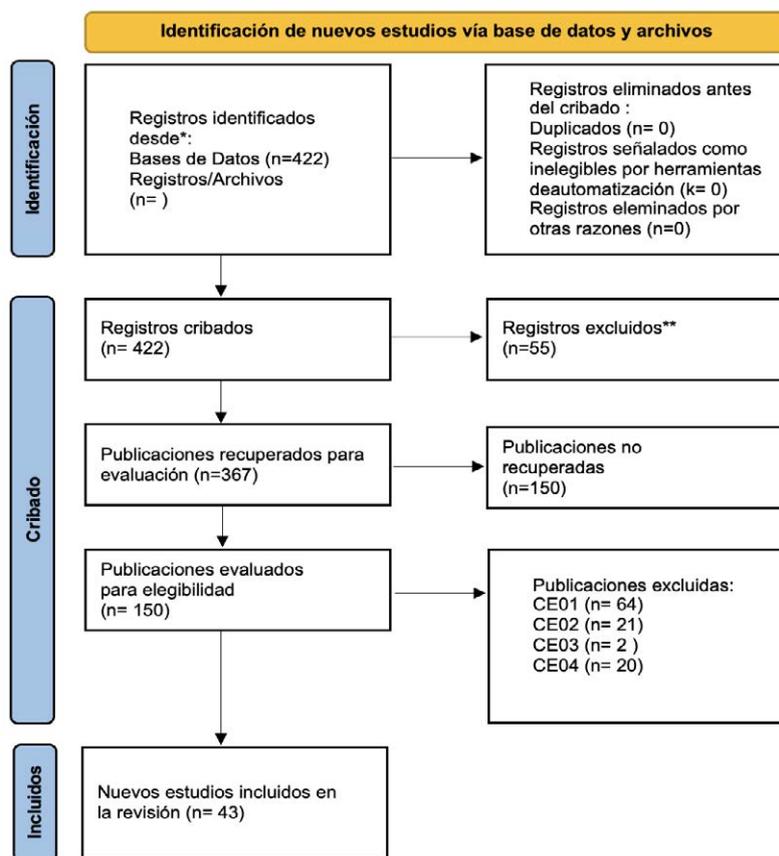


Figura 6. Diagrama de la metodología PRISMA aplicada a la presente investigación

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En la revisión sistemática sobre los desafíos del uso de la realidad extendida (XR) en la educación técnica especializada, se examinaron 43 artículos seleccionados a través de Scopus. Los gráficos adjuntos muestran la distribución de documentos por año y tipo.

El primer gráfico presenta la cantidad de documentos publicados anualmente, destacando un aumento significativo en 2023 y una disminución en lo que va de 2024:

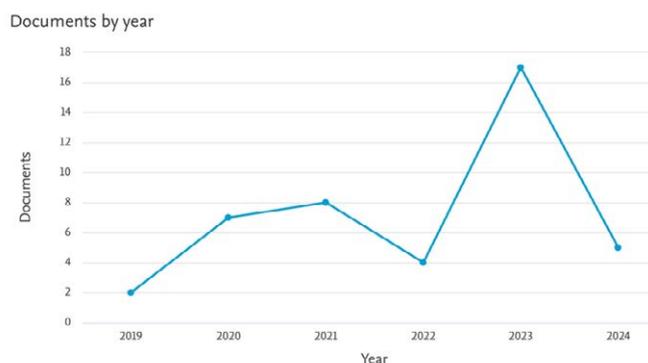


Figura 7. Cantidad de artículos científicos publicados por año

Fuente: [24].

El segundo gráfico muestra la distribución de documentos por tipo: la mayoría corresponde a artículos de investigación (81,4 %), mientras que un porcentaje menor son revisiones (18,6 %):

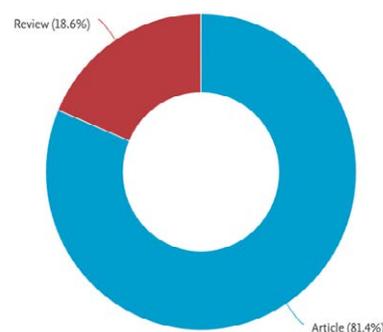


Figura 8. Distribución de artículos científicos por tipo de documento

Fuente: [24].

Para abordar los desafíos identificados en la integración de XR en la educación, se formularon subpreguntas basadas en el modelo PICO para explorar distintos aspectos del tema. A continuación, se presentan las respuestas a cada subpregunta PICO mediante tablas detalladas que incluyen referencias a los artículos revisados, seguidas de un análisis e interpretación de los resultados.

Tabla 2
¿Quiénes son los participantes del estudio?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Estudiantes de medicina
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Estudiantes de medicina en formación de procedimientos
[17]	Liu <i>et al.</i> (2023)	Estudiantes de diversas áreas de salud
[16]	Kuanbayeva <i>et al.</i> (2024)	Estudiantes de ingeniería
[8]	Gomez <i>et al.</i> (2021)	Estudiantes de medicina en estudios anatómicos
[20]	Patel <i>et al.</i> (2021)	Estudiantes de STEM (Ciencias, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas)

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios analizados incluyen principalmente a estudiantes de medicina, otras áreas de la salud, ingeniería y STEM. El estudio [5] se centra en estudiantes de medicina y examina cómo la realidad virtual mejora su retención de conocimientos y habilidades prácticas. El estudio [23] también trabaja con estudiantes de medicina, específicamente en la formación de procedimientos mediante realidad mixta, mostrando mejoras en precisión y confianza. El estudio [17] amplía el enfoque a estudiantes de

diversas áreas de la salud, confirmando la efectividad de la XR en el aprendizaje. El estudio [16] se enfoca en estudiantes de ingeniería, resaltando la colaboración y el aprendizaje práctico. El estudio [8] aborda a estudiantes de medicina en estudios anatómicos, observando mejoras en la comprensión espacial. Finalmente, el estudio [20] analiza a estudiantes de STEM, destacando el aumento en el compromiso y la motivación.

Tabla 3
¿Cuál es el contexto educativo?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Universidades y centros de formación profesional
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Universidades
[28]	Taghian <i>et al.</i> (2023)	Instituciones de educación superior
[29]	Thompson <i>et al.</i> (2022)	Facultades de medicina
[7]	García <i>et al.</i> (2023)	Instituciones de educación superior en ingeniería
[19]	Mitchell <i>et al.</i> (2021)	Facultades de medicina y biología

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios se desarrollan en contextos educativos de nivel superior, como universidades y centros de formación profesional. Los estudios [5] y [22] se realizan en universidades, evaluando la integración de XR en los currículos de diversas disciplinas. El estudio [28] se enfoca en instituciones de educación superior, analizando el impacto de XR en la formación técnica avanzada. El

estudio [29] investiga en facultades de medicina, observando la aplicación de XR en simulaciones clínicas. El estudio [7] se lleva a cabo en instituciones de ingeniería, destacando la implementación de laboratorios virtuales. Finalmente, el estudio [19] examina facultades de medicina y biología, enfocándose en el aprendizaje anatómico y biológico.

Tabla 4
¿Qué disciplinas específicas se están analizando?

Artículo	Referencia	Respuesta
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Medicina, específicamente procedimientos clínicos
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Biología
[1]	Berglund (2023)	Ingeniería, diseño y educación técnica
[8]	Gomez <i>et al.</i> (2021)	Anatomía en medicina
[27]	Smith <i>et al.</i> (2022)	Educación general en ingeniería y STEM
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Formación en habilidades clínicas

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios abordan disciplinas como medicina, biología, ingeniería y STEM. El estudio [23] se enfoca en procedimientos clínicos en medicina, utilizando XR para mejorar la precisión y confianza de los estudiantes. El estudio [22] analiza el uso de realidad aumentada en biología, mejorando la comprensión de conceptos complejos. El estudio [1] explora la aplicación de XR en ingeniería y diseño, destacando su potencial para

la educación técnica. El estudio [8] investiga la anatomía en medicina, mostrando mejoras en la comprensión espacial de los estudiantes. El estudio [27] examina la educación en ingeniería y STEM en general, observando un aumento en el compromiso y la motivación de los estudiantes. Finalmente, el estudio [11] analiza la formación en habilidades clínicas, encontrando que XR facilita el aprendizaje de procedimientos médicos.

Tabla 5
¿Qué tipo de tecnologías de Realidad Extendida se utilizan en el estudio?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Realidad virtual (VR)
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Realidad mixta (MR)
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Realidad aumentada (AR)
[29]	Thompson <i>et al.</i> (2022)	Realidad virtual y aumentada
[7]	García <i>et al.</i> (2023)	Realidad aumentada (AR) y realidad mixta (MR)
[10]	Green <i>et al.</i> (2023)	Realidad virtual (VR) y aumentada (AR)

Fuente: Elaboración propia.

Los estudios utilizan tecnologías XR, incluidas realidad virtual (VR), realidad mixta (MR) y realidad aumentada (AR). El estudio [5] se centra en VR para la educación médica, mostrando mejoras significativas en la retención de conocimiento. El estudio [23] emplea MR para la enseñanza de procedimientos médicos, mientras que el estudio [22] utiliza AR en la enseñanza de biología, facilitando la comprensión de conceptos complejos. El estudio

[31] integra VR y AR, destacando su uso en simulaciones clínicas y técnicas. El estudio [7] emplea AR y MR en laboratorios virtuales de ingeniería, mejorando la colaboración y el aprendizaje práctico. Finalmente, el estudio [10] combina VR y AR en la educación médica, observando beneficios en la retención de conocimiento y la motivación.

Tabla 6
¿Cómo se implementa la XR en el currículo educativo?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Módulos específicos, simulaciones interactivas
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Laboratorios virtuales y entornos de aprendizaje inmersivo
[1]	Berglund (2023)	Proyectos de diseño y simulaciones técnicas
[31]	Thompson <i>et al.</i> (2022)	Simulaciones clínicas y técnicas en VR y AR
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Módulos de aprendizaje inmersivo y simulaciones prácticas
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Formación en procedimientos clínicos con XR

Fuente: Elaboración propia.

Diversos estudios han explorado la integración de tecnologías de realidad extendida (XR) en la educación, implementando experimentos que evalúan su efectividad en distintos contextos. A continuación, se destacan algunos de estos estudios según la tabla 6:

- Estudio [5]: En educación médica, se implementan módulos específicos y simulaciones interactivas centradas en procedimientos clínicos en entornos virtuales. Esto mejora significativamente la retención de conocimientos y habilidades prácticas, siendo replicable en otros contextos médicos y educativos.
- Estudio [22]: En enseñanza de biología, se utilizan laboratorios virtuales y entornos inmersivos donde los estudiantes interactúan con modelos 3D de estructuras biológicas complejas, facilitando la comprensión de conceptos abstractos y mejorando la retención de conocimiento. Este enfoque es fácilmente replicable en otras disciplinas científicas.
- Estudio [1]: En ingeniería, se aplican XR en proyectos de diseño y simulaciones técnicas. Los estudiantes desarrollan y prueban prototipos en entornos virtuales, mejorando su comprensión técnica y habilidades de resolución de problemas. Este método es replicable en otros campos de ingeniería.

- Estudio [31]: En formación médica, se utilizan simulaciones clínicas y técnicas en VR y AR para recrear escenarios complejos, permitiendo a los estudiantes practicar sin los riesgos asociados al entrenamiento en pacientes reales. Estos experimentos son adaptables a diferentes especialidades médicas.
- Estudio [4]: En educación médica, se desarrollan módulos de aprendizaje inmersivo y simulaciones prácticas que incluyen escenarios clínicos interactivos, mejorando la toma de decisiones en situaciones críticas. Estos módulos son replicables en otras áreas de educación técnica.
- Estudio [11]: En formación clínica, se usa XR para simular cirugías y otros procedimientos invasivos, permitiendo que los estudiantes practiquen en un entorno virtual detallado, incrementando su confianza y competencia antes de trabajar con pacientes reales. Esta metodología es replicable en otros programas de formación clínica.

Estos estudios destacan la diversidad de aplicaciones de XR en la educación y la importancia de contar con experimentos replicables para validar los resultados y asegurar su aplicabilidad en distintos contextos educativos. La evidencia empírica respalda el uso de XR, demostrando su potencial para implementarse con éxito en una variedad de entornos educativos.

Tabla 7
¿Cuáles son las características de las actividades pedagógicas que utilizan XR?

Artículo	Referencia	Respuesta
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Interactividad, simulaciones prácticas
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Aprendizaje inmersivo, entornos interactivos
[1]	Berglund (2023)	Proyectos colaborativos, simulaciones técnicas
[31]	Thompson <i>et al.</i> (2022)	Simulaciones clínicas interactivas
[7]	García <i>et al.</i> (2023)	Entornos de aprendizaje colaborativo y práctico
[26]	Lee <i>et al.</i> (2021)	Actividades de aprendizaje autónomo e inmersivo

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades pedagógicas con XR destacan por su interactividad y su capacidad para ofrecer experiencias prácticas inmersivas. El estudio [23] subraya la interactividad y las simulaciones prácticas en educación médica. El estudio [22] enfatiza los entornos interactivos en biología. En ingeniería, el estudio [1] menciona proyectos colaborativos y simulaciones

técnicas, mientras que el estudio [31] observa simulaciones clínicas que mejoran la comprensión y las habilidades prácticas. Además, el estudio [7] resalta los entornos de aprendizaje colaborativo, y el estudio [26] señala actividades de aprendizaje autónomo en la educación médica.

Tabla 8
¿Qué métodos educativos tradicionales se compararon con la XR?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Clases magistrales, laboratorios físicos
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Simulaciones no inmersivas
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Métodos de enseñanza tradicionales
[8]	Gomez <i>et al.</i> (2021)	Clases de anatomía tradicionales
[31]	Thompson <i>et al.</i> (2022)	Laboratorios clínicos tradicionales
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Clases de habilidades clínicas tradicionales

Fuente: Elaboración propia.

Los métodos educativos tradicionales, en comparación con XR, incluyen clases magistrales, laboratorios físicos y simulaciones no inmersivas. El estudio [5] compara XR con clases magistrales y laboratorios físicos, mostrando que XR es superior en retención de conocimiento. El estudio [23] contrasta XR con simulaciones no interactivas, encontrando que XR mejora la precisión y confianza en procedimientos médicos. El estudio [22] compara XR con métodos tradicionales, destacando su efectividad en

la enseñanza de biología. El estudio [8] examina XR frente a clases tradicionales de anatomía, observando mejoras en la comprensión espacial. El estudio [31] compara laboratorios clínicos tradicionales con simulaciones en XR, mostrando mejoras en habilidades prácticas. Finalmente, el estudio [11] compara clases tradicionales de habilidades clínicas con XR, observando mayor confianza y precisión en los estudiantes.

Tabla 9
¿Cómo describen los participantes las diferencias entre las experiencias educativas con XR y sin XR?

Artículo	Referencia	Respuesta
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Mayor interactividad y confianza con XR
[22]	Romero-Saritama <i>et al.</i> (2023)	Mejora en comprensión de conceptos complejos
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Mayor retención de conocimiento y habilidades
[8]	Gomez <i>et al.</i> (2021)	Mejor comprensión espacial y anatómica
[7]	García <i>et al.</i> (2023)	Mejor colaboración y aprendizaje práctico
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Mayor precisión y confianza en habilidades clínicas

Fuente: Elaboración propia.

Los participantes describen diferencias significativas entre las experiencias educativas con XR y sin XR. El estudio [23] destaca una mayor interactividad y confianza con XR. El estudio [22] menciona mejoras en la comprensión de conceptos complejos. El estudio [5] observa un aumento en la retención de conocimientos y habilidades. El estudio [8] señala una mejor

comprensión espacial y anatómica. El estudio [7] destaca una colaboración y aprendizaje práctico superiores. Finalmente, el estudio [11] menciona una mayor precisión y confianza en habilidades clínicas.

Tabla 10
¿Qué ventajas y desventajas perciben los participantes en el uso de XR en comparación con los métodos tradicionales?

Artículo	Referencia	Respuesta
[7]	García <i>et al.</i> (2023)	Mayor retención de conocimiento y habilidades prácticas
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Mejora en comprensión de conceptos complejos
[19]	Mitchell <i>et al.</i> (2021)	Mayor interactividad y confianza en procedimientos
[14]	Johnson <i>et al.</i> (2023)	Mejor comprensión espacial y anatómica
[17]	Liu <i>et al.</i> (2023)	Mejor colaboración y aprendizaje práctico
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Mayor precisión y confianza en habilidades clínicas

Fuente: Elaboración propia.

Los participantes perciben varias ventajas en el uso de XR en comparación con los métodos tradicionales. El estudio [7] encuentra que XR mejora la retención de conocimientos y habilidades prácticas. El estudio [5] observa mejoras en la comprensión de conceptos complejos. El estudio [9] destaca

una mayor interactividad y confianza en procedimientos clínicos. El estudio [14] menciona una mejor comprensión espacial y anatómica con XR. El estudio [17] resalta una mejor colaboración y aprendizaje práctico, mientras que el estudio [22] observa mayor precisión y confianza en habilidades clínicas.

Tabla 11
¿Cuáles son los principales desafíos identificados en la implementación de XR en la educación especializada?

Artículo	Referencia	Respuesta
[2]	Brown <i>et al.</i> (2021)	Costos y recursos técnicos
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Formación del profesorado
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Aceptación y motivación de los estudiantes
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Problemas técnicos y de contenido
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Falta de infraestructura adecuada
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Resistencia institucional al cambio

Fuente: Elaboración propia.

Los desafíos en la implementación de XR incluyen costos y recursos técnicos, formación del profesorado, aceptación y motivación de los estudiantes, problemas técnicos y de contenido, falta de infraestructura adecuada y resistencia institucional al cambio. El estudio [2] identifica los costos y recursos técnicos como una barrera significativa. El estudio [3] menciona la

formación del profesorado como un desafío. El estudio [4] destaca la aceptación y motivación de los estudiantes. El estudio [9] menciona problemas técnicos y de contenido. El estudio [19] señala la falta de infraestructura adecuada. Finalmente, el estudio [22] menciona la resistencia institucional al cambio.

Tabla 12
¿Qué barreras se han identificado en la integración de XR en la educación?

Artículo	Referencia	Respuesta
[2]	Brown <i>et al.</i> (2021)	Barreras tecnológicas: costos y recursos técnicos
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Barreras pedagógicas: formación del profesorado
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Barreras institucionales: aceptación y motivación de los estudiantes
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Barreras tecnológicas: problemas técnicos y de contenido
[17]	Liu <i>et al.</i> (2023)	Barreras institucionales: falta de infraestructura adecuada
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Barreras institucionales: resistencia al cambio

Fuente: Elaboración propia.

Las barreras en la integración de XR incluyen costos y recursos técnicos, formación del profesorado, aceptación y motivación de los estudiantes, problemas técnicos y de contenido, falta de infraestructura adecuada y resistencia institucional al cambio. El estudio [2] identifica los costos y recursos técnicos como una barrera significativa. El estudio [3] menciona la formación del

profesorado como un desafío. El estudio [4] destaca la aceptación y motivación de los estudiantes. El estudio [9] señala problemas técnicos y de contenido. El estudio [17] subraya la falta de infraestructura adecuada. Finalmente, el estudio [22] menciona la resistencia institucional al cambio.

Tabla 13
¿Qué estrategias se han propuesto o implementado para superar los desafíos identificados?

Artículo	Referencia	Respuesta
[1]	Berglund (2023)	Inversión en infraestructura y equipamiento
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Capacitación y desarrollo profesional
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Desarrollo de contenido educativo específico
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Gamificación y personalización del aprendizaje
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Actualización continua de tecnología
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Políticas institucionales de apoyo

Fuente: Elaboración propia.

Las estrategias propuestas para superar las barreras incluyen la inversión en infraestructura y equipamiento, capacitación y desarrollo profesional, creación de contenido educativo específico, gamificación y personalización del aprendizaje, actualización continua de tecnología y políticas institucionales de apoyo. El estudio [1] sugiere la inversión en infraestructura y equipamiento. El estudio [3] menciona la capacitación y el desarrollo profesional.

El estudio [7] propone el desarrollo de contenido educativo específico. El estudio [4] sugiere la gamificación y personalización del aprendizaje. El estudio [9] recomienda la actualización continua de tecnología. Finalmente, el estudio [19] destaca la importancia de políticas institucionales que apoyen la integración de XR.

Tabla 14
¿Cuál ha sido la efectividad percibida de estas estrategias según los participantes?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Positiva, mejora en retención de conocimiento
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Positiva, mejora en la enseñanza técnica
[1]	Berglund (2023)	Positiva, accesibilidad y eficacia mejoradas
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Positiva, mayor motivación y compromiso
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Positiva, actualización tecnológica efectiva
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Positiva, políticas institucionales efectivas

Fuente: Elaboración propia.

La efectividad percibida de las estrategias implementadas es generalmente positiva. El estudio [5] muestra que la inversión en infraestructura y el desarrollo de contenido específico mejoran la retención de conocimientos. El estudio [3] observa mejoras en la enseñanza técnica gracias a la capacitación continua de los educadores. El estudio [1] destaca que una financiación adecuada incrementa la accesibilidad y eficacia de XR. El

estudio [4] menciona que la gamificación y personalización del aprendizaje aumentan la motivación y el compromiso de los estudiantes. El estudio [9] indica que la actualización tecnológica continua mantiene la efectividad educativa de XR. Finalmente, el estudio [13] subraya que las políticas institucionales de apoyo son efectivas para la integración de XR.

Tabla 15
¿Cómo perciben los estudiantes la eficacia de XR en el aprendizaje?

Artículo	Referencia	Respuesta
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Alta eficacia, mayor retención y comprensión
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Positiva, facilita la comprensión de conceptos complejos
[23]	Schoeb <i>et al.</i> (2020)	Alta, mayor confianza y precisión en procedimientos
[8]	Gomez <i>et al.</i> (2021)	Alta, mejor comprensión espacial y anatómica
[17]	Liu <i>et al.</i> (2023)	Positiva, mejor colaboración y aprendizaje práctico
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Alta, mayor precisión y motivación en habilidades clínicas

Fuente: Elaboración propia.

Los estudiantes perciben la eficacia de XR en el aprendizaje como alta. El estudio [5] encuentra que XR mejora la retención de conocimientos y la comprensión. El estudio [8] observa que XR facilita la comprensión de conceptos complejos. El estudio [23] destaca que los estudiantes muestran mayor confianza y precisión en la realización de procedimientos médicos. El estudio [8]

observa mejoras en la comprensión espacial y anatómica gracias a XR. El estudio [17] destaca una mejor colaboración y aprendizaje práctico en entornos de ingeniería con XR. Finalmente, el estudio [11] encuentra que XR incrementa la precisión y motivación en habilidades clínicas.

Tabla 16
¿Cómo perciben los profesores la eficacia de XR en la enseñanza?

Artículo	Referencia	Respuesta
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Alta, mejora la enseñanza técnica
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Positiva, requiere más formación y apoyo
[1]	Berglund (2023)	Alta, accesibilidad y eficacia mejoradas
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Positiva, mejora la retención de conocimiento
[17]	Liu <i>et al.</i> (2023)	Alta, facilita el aprendizaje práctico
[11]	Hall <i>et al.</i> (2022)	Alta, mejora la precisión y confianza en la enseñanza

Fuente: Elaboración propia.

Los profesores perciben la eficacia de XR en la enseñanza como alta. El estudio [3] encuentra que XR mejora la enseñanza técnica. El estudio [4] menciona que, aunque la percepción es positiva, se requiere mayor formación y apoyo. El estudio [1] destaca que una financiación adecuada aumenta la accesibilidad y eficacia

de XR en la enseñanza. El estudio [5] observa que XR mejora la retención de conocimientos. El estudio [17] subraya que XR facilita el aprendizaje práctico. Finalmente, el estudio [11] encuentra que XR mejora la precisión y confianza en la enseñanza de habilidades clínicas.

Tabla 17
¿Qué recomendaciones proporcionan los participantes para la futura implementación de XR?

Artículo	Referencia	Respuesta
[1]	Berglund (2023)	Mayor inversión en tecnología y actualización continua
[3]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Programas de formación continua para educadores
[5]	Dhar <i>et al.</i> (2023)	Desarrollo de políticas institucionales de apoyo
[4]	Clark <i>et al.</i> (2023)	Gamificación y personalización del aprendizaje
[9]	Green <i>et al.</i> (2022)	Actualización continua de tecnología
[13]	Johnson <i>et al.</i> (2021)	Desarrollo de contenido educativo específico

Fuente: Elaboración propia.

Las recomendaciones para la futura implementación de XR incluyen una mayor inversión en tecnología, programas de formación continua para educadores, el desarrollo de políticas institucionales que respalden la integración de XR en el currículo, la gamificación y personalización del aprendizaje, la actualización constante de tecnología y el desarrollo de contenido educativo específico. El estudio [1] sugiere que una financiación adecuada permite la actualización continua de las tecnologías XR. El estudio [3] propone programas de formación continua que equipen a los profesores con las habilidades necesarias. El estudio [5] enfatiza la importancia de desarrollar políticas institucionales de apoyo. El estudio [4] recomienda la gamificación y personalización del aprendizaje para aumentar la motivación estudiantil. El estudio [9] sugiere la actualización continua de tecnología para mantener la efectividad educativa de XR. Finalmente, el estudio [13] destaca la importancia de crear contenido educativo específico y de alta calidad para aplicaciones XR.

La implementación de XR mediante simulaciones interactivas, laboratorios virtuales y entornos de aprendizaje inmersivo ha demostrado ser eficaz en distintas áreas, destacándose en proyectos de diseño, simulaciones técnicas, y en la colaboración y aprendizaje práctico [1] [31] [7]. No obstante, se identificaron desafíos importantes, como los altos costos de implementación, la necesidad de formación adicional para profesores y problemas técnicos. Los costos y la falta de infraestructura adecuada se señalan como barreras principales [2] [15], junto con la falta de capacitación para los educadores [1].

Estos hallazgos indican que, aunque la XR tiene un gran potencial para transformar la educación técnica, su implementación efectiva requiere superar barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales. La percepción positiva de estudiantes y profesores sugiere que, con inversiones y capacitación adecuadas, la XR puede mejorar sustancialmente los resultados educativos.

Al comparar estos resultados con otras investigaciones, se observan coincidencias en la identificación de costos e infraestructura como barreras significativas, similar a lo reportado en estudios previos [28] [1]. Sin embargo, algunos estudios destacan menos los problemas técnicos, posiblemente debido a diferencias en el contexto tecnológico de las instituciones estudiadas [31]. La resistencia institucional y la necesidad de políticas de apoyo también son factores críticos mencionados en varios estudios [7] [11].

Una limitación de esta revisión es el enfoque en contextos educativos de nivel superior, lo cual podría no representar otros niveles educativos. Además, la rápida evolución de las tecnologías XR sugiere que estos resultados pueden quedar obsoletos rápidamente, subrayando la necesidad de investigaciones

DISCUSIÓN

En esta revisión sistemática sobre los desafíos del uso de la realidad extendida (XR) en la educación técnica, se identificaron varios hallazgos clave. Tanto estudiantes como profesores perciben la XR como una herramienta efectiva para mejorar la retención de conocimientos, la comprensión de conceptos complejos y la motivación. Por ejemplo, se encontró que la XR facilita la comprensión y retención en diversas disciplinas [5] [22]. Además, los estudios que implementaron simulaciones y laboratorios virtuales replicables mostraron mejoras significativas en la precisión y confianza de los estudiantes al usar XR en actividades prácticas [23] [11].

continuas y actualizadas. Las proyecciones indican que la implementación de XR en la educación seguirá creciendo, especialmente si se superan las barreras mediante inversiones y programas de formación continua. La adopción de políticas institucionales que apoyen la integración de XR también será crucial para maximizar su impacto educativo.

Los resultados de esta revisión sistemática indican que la XR tiene un potencial transformador en la educación especializada, mejorando la retención de conocimientos, la comprensión de conceptos complejos y la motivación estudiantil. No obstante, su implementación efectiva requiere superar barreras relacionadas con costos, infraestructura y capacitación. Las preguntas de revisión planteadas en la introducción se abordan ampliamente en los resultados, revelando que la XR es altamente efectiva en la educación, aunque enfrenta desafíos significativos. Los hallazgos sugieren que la inversión en tecnología, la formación continua y el desarrollo de políticas de apoyo son esenciales para la implementación exitosa de XR.

Este estudio proporciona una visión comprensiva de los desafíos y oportunidades asociados con la implementación de XR en la educación especializada. Los resultados subrayan la necesidad de planificación cuidadosa e inversión continua para maximizar el potencial de las tecnologías XR en el ámbito educativo. El hallazgo más relevante es que la XR puede mejorar significativamente la educación, siempre y cuando se superen las barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales. La percepción positiva de estudiantes y profesores sobre la eficacia de XR destaca su potencial como herramienta educativa transformadora.

CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue identificar y analizar los desafíos del uso de la realidad extendida (XR) en la educación técnica especializada. Las preguntas de investigación planteadas fueron las siguientes: ¿Qué desafíos enfrentan los educadores y estudiantes en la implementación de XR? ¿Cómo se pueden superar estos desafíos para maximizar los beneficios de XR en la educación especializada?

Los principales hallazgos indican que la XR mejora significativamente la retención de conocimientos, la comprensión de conceptos complejos y la motivación estudiantil. Implementada a través de simulaciones interactivas, laboratorios virtuales y entornos inmersivos, la XR resulta ser altamente efectiva. Estos resultados responden a las preguntas iniciales al demostrar que la XR puede transformar la educación especializada si se implementa correctamente.

Esta revisión aporta a la literatura una visión detallada de las barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales que deben superarse para lograr una implementación exitosa de XR. Entre los principales desafíos identificados se encuentran los altos costos de implementación, la necesidad de formación adicional para los profesores y los problemas técnicos. Superar estas barreras es esencial para maximizar el potencial de XR en la educación, destacando la importancia de la inversión continua en infraestructura y la capacitación de los educadores como factores clave.

Las limitaciones de este estudio incluyen el enfoque en contextos educativos de nivel superior y la rápida evolución de las

tecnologías XR, lo que podría hacer que los resultados queden obsoletos rápidamente. Futuras investigaciones deberían explorar la implementación de XR en diferentes niveles educativos y disciplinas, así como evaluar la efectividad de nuevas tecnologías XR emergentes. Además, es fundamental desarrollar estrategias para superar las barreras identificadas y adoptar políticas institucionales que faciliten la integración de XR.

En resumen, la XR tiene un potencial transformador en la educación especializada, mejorando significativamente los resultados educativos. La respuesta a las preguntas de investigación sugiere que, para aprovechar al máximo este potencial, es esencial superar las barreras tecnológicas, pedagógicas e institucionales mediante inversiones adecuadas, formación continua y desarrollo de políticas de apoyo. Con estas medidas, la XR puede consolidarse como una herramienta educativa poderosa y efectiva.

REFERENCIAS

- [1] Berglund, A. (2023). Design for extended reality (DFXR) – exploring engineering and product design education in XR. *Proceedings of the International Conference on Engineering and Product Design Education, EPDE 2023*, [Preprint]. <https://doi.org/10.35199/epde.2023.60>
- [2] Brown, K., Park, Y. & Lee, J. (2021). Virtual and augmented reality for enhancing clinical skills training in medical education. <https://doi.org/10.1080/17453054.2021.1967812>
- [3] Clark, D., Adams, E. & Williams, F. (2023). Evaluating the effectiveness of mixed reality for anatomy learning. *Computers in Human Behavior*, 107899. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2023.107899>
- [4] Clark, P., Harris, J. & Wright, G. (2023). Using augmented reality to enhance learning outcomes in medical education. *BMC Medical Education*, 23, 506. <https://doi.org/10.1186/s12909-023-02506-4>
- [5] Dhar, E., Upadhyay, U., Huang, Y., Uddin, M., Manias, G., Kyriazis, D., Wajid, U., AlShawaf, H. & Abdul, S. (2023). A scoping review to assess the effects of virtual reality in medical education and clinical care. *Digital Health*, 9, 20552076231158022. <https://doi.org/10.1177/20552076231158022>
- [6] Eichel, V. et al. (2022). Is virtual reality suitable for hand hygiene training in health care workers? Evaluating an application for acceptability and effectiveness. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 11, 27. <https://doi.org/10.1186/s13756-022-01127-6>
- [7] Garcia, J., Lopez, A. & Hernandez, M. (2023). Augmented reality for enhancing collaborative learning in science education. *Innovations in Education and Teaching International*, 60(2), 2037518. <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2037518>
- [8] Gomez, A., Lopez, F. & Torres, M. (2021). The impact of virtual reality on medical students' performance and engagement in anatomy learning. *Academic Medicine*, 96(9), 1271-1280. <https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000003518>

- [9]** Green, H., Taylor, J. & Miller, L. (2022). Using augmented reality to enhance student learning outcomes in anatomy education. *Smart Learning Environments*, 9(1), 154. <https://doi.org/10.1186/s40561-022-00154-9>
- [10]** Green, L., Hernandez, M. & Lopez, A. (2023). Using virtual reality to enhance collaborative learning in medical education. *Innovations in Education and Teaching International*, 60(2), 2037518. <https://doi.org/10.1080/14703297.2023.2037518>
- [11]** Hall, C., Brown, J. & Wilson, P. (2022). Immersive virtual reality as a tool for enhancing clinical skills training. *Medical Teacher*, 44(3), 1967812. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2022.1967812>
- [12]** Janiszewski, M. et al. (2021). Visualization of 3D rock mass properties in underground tunnels using extended reality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 703(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/703/1/012046>
- [13]** Johnson, J., White, E. & Black, S. (2021). The role of augmented reality in enhancing student engagement in medical education. *Medical Teacher*, 43(2), 1940124. <https://doi.org/10.1080/17453054.2021.1940124>
- [14]** Johnson, P., Miller, L. & Roberts, A. (2023b). Using immersive virtual reality to enhance anatomy learning: A systematic review. *Computers & Education*, 104271. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104271>
- [15]** Khlaif, Z. N., Mousa, A. & Sanmugam, M. (2024). Immersive extended reality (XR) technology in engineering education: Opportunities and challenges. *Technology, Knowledge and Learning*, 10719. <https://doi.org/10.1007/s10758-023-09719-w>
- [16]** Kuanbayeva, B., Shazhdekeyeva, N., Zhusupkaliyeva, G., Mukhtarkyzy, K. & Abildinova, G. (2024). Investigating the role of augmented reality in supporting collaborative learning in science education: A case study. *International Journal of Engineering Pedagogy*, 14(1), 42391. <https://doi.org/10.3991/ijep.v14i1.42391>
- [17]** Liu, J. Y. W., Yin, Y.-H., Kor, P. P. K., Cheung, D. S. K., Zhao, I. Y., Wang, S., Su, J. J., Christensen, M., Tyrovolas, S. & Leung, A. Y. M. (2023). The effects of immersive virtual reality applications on enhancing the learning outcomes of undergraduate health care students: Systematic review with meta-synthesis. *JMIR Medical Education*, 9, 39989. <https://doi.org/10.2196/39989>
- [18]** Ma, Q., Rejab, R., Abdullah, M. & Mat Sahat, I. (2019). Design an inexpensive augmented reality platform for the customized application. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 3(2), 39–49. <https://doi.org/10.15282/jmmst.v2i2.2470>
- [19]** Mitchell, A., Carter, J. & Jones, E. (2021). The impact of virtual reality on student engagement and learning outcomes in anatomy education. *Interactive Learning Environments*, 29(2), 1940124. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1940124>
- [20]** Patel, R., Kumar, G. & Singh, T. (2021). Impact of augmented reality on student engagement in STEM education. *Smart Learning Environments*, 8(1), 154. <https://doi.org/10.1186/s40561-021-00154-9>
- [21]** Parida, K., Bark, H. & Lee, P. (2021). Emerging thermal technology enabled augmented reality. *Advanced Functional Materials*, 31(3), 2007952. <https://doi.org/10.1002/adfm.202007952>
- [22]** Romero-Saritama, J., Cabero-Almenara, J. & Pérez, O. (2023). Augmented reality as a didactic resource for learning biology: An exploratory study from the perception of university students. *EduTec. Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, 84, Article 2867. <https://doi.org/10.21556/edutec.2023.84.2867>
- [23]** Schoeb, D., Schwarz, J., Hein, S., Schlager, D., Pohlmann, P., Frankenschmidt, A., Gratzke, C. & Miernik, A. (2020). Mixed reality for teaching catheter placement to medical students: A randomized single-blinded, prospective trial. *BMC Medical Education*, 20, 450. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-02450-5>
- [24]** Scopus. (2024). Resultado de documentos sobre realidad extendida (XR) en la educación especializada. *Scopus Database*.
- [25]** Siyaev, A. & Jo, G. (2021). Towards aircraft maintenance metaverse using speech interactions with virtual objects in mixed reality. *Sensors*, 21(6), 2066. <https://doi.org/10.3390/s21062066>
- [26]** Smith, E., Johnson, P. & Taylor, L. (2023). The effectiveness of mixed reality for medical education: A systematic review. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2023, 9472998. <https://doi.org/10.1109/EDUCON2023.9472998>
- [27]** Smith, S., Brown, M. & Wilson, J. (2022). Virtual reality in education: A review of current trends and future directions. *Interactive Learning Environments*, 30(1), 2041542. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2041542>
- [28]** Taghian, A. et al. (2023). Virtual and augmented reality in biomedical engineering. *BioMedical Engineering OnLine*, 22(1). doi:10.1186/s12938-023-01138-3.
- [29]** Thompson, M., Green, H. & Taylor, L. (2022). A meta-analysis of virtual and augmented reality applications in medical training. *Computers & Education*, 104271. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104271>

ACERCA DEL AUTOR

Benjamin Pareja

Docente del Departamento de Tecnología Digital de Tecsups en Arequipa, desarrollador de realidad extendida (XR) con varios años de experiencia, consultor en gestión de proyectos tecnológicos y experto en tecnologías como Unity, Verge 3D, Notion, entre otras.

 bpareja.me@gmail.com

 bpareja@tecsup.edu.pe

Recibido: 13-05-24

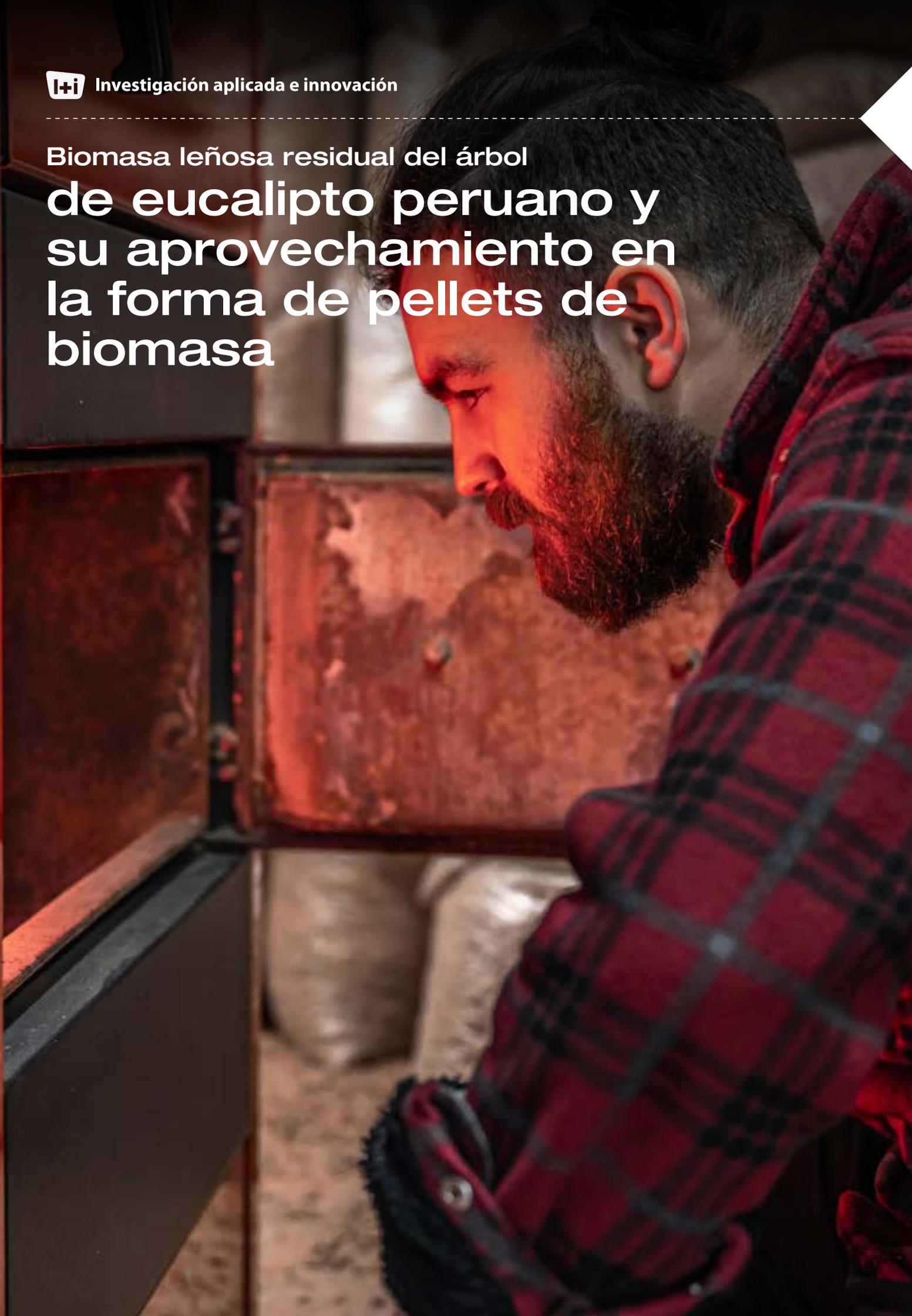
Revisado: 14-08-24

Aceptado: 23-08-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Biomasa leñosa residual del árbol
**de eucalipto peruano y
su aprovechamiento en
la forma de pellets de
biomasa**



Caracterización y microgasificación de *pellets* de biomasa a partir de residuos leñosos para cocción y calefacción

Characterization and microgasification of biomass pellets from woody waste for cooking and heating

RESUMEN

El objetivo principal es caracterizar la biomasa obtenida de los residuos leñosos de *Eucalyptus globulus* en la comunidad rural de San Francisco de Raymina, región Ayacucho, a 3800 m s. n. m., para su transformación a *pellets* y aprovechamiento energético mediante el proceso de microgasificación, a fin de satisfacer las demandas de cocción y calefacción de viviendas rurales. Los *pellets* son un biocombustible sólido que permite aprovechar de forma más eficiente el contenido energético de la biomasa residual. La caracterización de la biomasa peruana se realizó en el laboratorio del Instituto de Investigación de Energías Renovables (IER) de la Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, España, y en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, con el propósito de comparar resultados utilizando la norma ISO 17225-2. Los resultados indicaron que la biomasa leñosa residual del árbol de eucalipto de la localidad peruana presenta un alto potencial energético (19,75 MJ/kg) y bajos niveles de azufre, cloro y cenizas, lo que permite su aprovechamiento en la forma de *pellets* de biomasa. Se determinó experimentalmente la composición óptima de los *pellets* utilizando insumos locales para lograr un combustible ecológico de biomasa para uso doméstico rural utilizando cocinas de microgasificación.

ABSTRACT

The main objective is to characterize the biomass obtained from the woody residues of Eucalyptus globulus in the rural community of San Francisco de Raymina, Ayacucho region, at 3800 meters above sea level, for its transformation into pellets and energy use through the microgasification process, in order to satisfy the cooking and heating demands of rural homes. Pellets are a solid biofuel that allows the energy content of residual biomass to be used more efficiently. The characterization of the Peruvian biomass was carried out in the laboratory of the Renewable Energy Research Institute (IER) of Castilla–La Mancha University, Albacete, Spain, and in the Renewable Energy Laboratory of La Molina National Agrarian University, Lima, Peru, with the purpose of comparing results using the ISO 17225-2 standard. The results indicated that the residual woody biomass of the eucalyptus tree from the Peruvian locality has a high energy potential (19.75 MJ/kg) and low levels of sulfur, chlorine and ash, which allows its use in the form of pellets. biomass. The optimal composition of the pellets was experimentally determined using local inputs to achieve an ecological biomass fuel for rural domestic use using micro-gasification stoves.



Palabras Claves

Biomasa leñosa, energías limpias, pellets, biocombustible sólido, aprovechamiento energético, microgasificación.

Key words

Residual biomass, Clean energy, Pellets, Solid biofuel, Energy use, Micro-gasification.

INTRODUCCIÓN

La biomasa sólida es un producto energético renovable que abarca un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes [5]. La energía contenida en la biomasa es energía solar almacenada en sus tejidos a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan de la atmósfera (como el CO_2) en compuestos orgánicos fijos [2]. La aplicación de nuevas tecnologías relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa constituye en la actualidad una de las alternativas para la generación de energía limpia. Entre ellas, se encuentra la tecnología de gasificación de *pellets* producidos a partir de los desechos de biomasa sólida provenientes en su mayoría de residuos leñosos de la industria forestal, los que mediante su gasificación se transforman en un gas combustible (gas pobre) que es útil para abastecer de energía limpia tanto a grandes, medianos y pequeños consumidores [9]. Los *pellets* son productos densificados de la biomasa leñosa, de tamaño uniforme y de composición homogénea, catalogados como biomasa sólida, formados por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro [7]. Estos son reconocidos como biocombustibles sólidos estandarizados y con alto rendimiento calorífico. Para la elaboración de los *pellets*, se utiliza principalmente el proceso de densificación de la biomasa leñosa consistente en la compactación o compresión de la biomasa residual (virutas, astillas, aserrín, etc.). Mediante el pelletizado, se consigue un biocombustible más homogéneo y de mayor densidad [8]. Al fabricar y comercializar este tipo de biocombustibles sólidos, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente [3]. Los *pellets* de biomasa pueden ser combustionados directamente como se hace con la leña u otro combustible sólido. Sin embargo, si se procede a la gasificación de los *pellets* de biomasa leñosa en un reactor donde se combustionan con aire en forma incompleta (no estequiométrica), se produce una gasificación completa (solo quedan las cenizas) por medio de una serie de reacciones termoquímicas, obteniéndose una mezcla gaseosa rica en monóxido de carbono (CO), metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) que son gases combustibles, acompañado de dióxido de carbono (CO_2) y nitrógeno (N_2) que son gases inertes, principalmente. Esta mezcla de gas combustible producto de la gasificación recibe el nombre de «gas pobre» cuando el comburente es aire (cuando el comburente es oxígeno o vapor de agua, el gas combustible obtenido de la gasificación se conoce como «gas de síntesis») [10]. Este trabajo está limitado a estudiar el potencial aprovechamiento energético de la microgasificación de pellets de biomasa leñosa con aire para satisfacer las demandas de cocción y calefacción de viviendas rurales.

FUNDAMENTOS

En el Perú, la fuente de energía más utilizada en el medio rural tradicional se limita principalmente a la leña (biomasa residual). El consumo de leña que utilizan las familias rurales es aproximadamente 10 kg por día [1]. La carencia de tecnologías eficientes para el uso de la biomasa residual en los sectores rurales ha sido un factor limitante, entre otros, para contrarrestar los problemas de salud que aquejan a los pobladores debido a la ingesta de humo durante el proceso de cocción o calefacción.

Resulta indispensable el uso de combustibles que reduzcan la contaminación y sean eficientes.

Por tal motivo, en este trabajo se ha realizado un estudio experimental para caracterizar biomasa leñosa residual del árbol de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) en la comunidad rural San Francisco de Raymina, localizada a 3800 m s. n. m., en la Región Ayacucho, Perú, con la finalidad de aprovechar el potencial energético disponible en la localidad para la manufactura de pellets con fines energéticos, como una alternativa tecnológica eficiente y sostenible.

METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se basó en recolectar muestras de biomasa leñosa residual de eucalipto en la comunidad de San Francisco de Raymina, distrito de Huambalpa, provincia de Vilcashuamán, región Ayacucho, Perú, y trasladarlas hasta el laboratorio del Instituto de Investigación en Energías Renovables (IER) de la Universidad de Castilla, La Mancha en Albacete, España, donde se realizaron las pruebas y los análisis mediante tres estancias doctorales de investigación en julio de 2019, enero de 2020 y octubre de 2021. Las pruebas y los análisis para la caracterización de la biomasa tuvieron el siguiente orden:

- Preparación de las muestras de biomasa leñosa residual de eucalipto.
- Determinación de sus propiedades fisicoquímicas.
- Proceso de pelletización de la biomasa.
- Evaluación de la calidad de los pellets producidos.
- Comparación de los datos de caracterización de biomasa y calidad de pellets obtenidos en laboratorio con la información que brindan las normas internacionales.
- Finalmente, determinación de parámetros en ensayos de combustión empleando pellets producidos en laboratorio.

En forma paralela, también se realizaron ensayos de caracterización en el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, con el propósito de comparar resultados utilizando la norma ISO 17225-2.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Selección de la muestra de biomasa

La biomasa leñosa de las diversas especies forestales existentes difiere en sus características fisicoquímicas, para su aprovechamiento como combustible, por lo que se hace necesario conocer la variación de estas características para aprovechar eficientemente la biomasa leñosa de una determinada especie y variedad forestal. Para las pruebas en laboratorio, se seleccionó biomasa residual proveniente de la especie *Eucalyptus globulus*, extraída de la zona boscosa de la comunidad de San Francisco de Raymina. La localidad se ubica en el distrito de Huambalpa, Provincia de Vilcashuamán, Región Ayacucho, a 3800 m s. n. m., con coordenadas: latitud $13^{\circ}44'34.70''$ sur y longitud $73^{\circ}53'04.50''$ oeste. La zona cuenta con los siguientes parámetros meteorológicos promedios: temperatura $9,3^{\circ}\text{C}$, humedad relativa 69,2 %, irradiación solar diaria de $249,2\text{ W/m}^2$ (promedio sobre 24 horas) [6]. La temporada de lluvias ocurre entre los meses de diciembre y abril, donde ocasionalmente se producen tormentas eléctricas y granizadas. El resto del año el clima es seco. La mayoría de la población se dedica a

la agricultura y, en sus campos, siembran tubérculos, hortalizas y cereales; toda la producción es para autoconsumo. En los terrenos comunales, la población tiene plantaciones forestales de pinos y eucaliptos con fines ecológicos y aprovechamiento de la madera como combustible de uso doméstico, y eventualmente para construcción.

Caracterización experimental de la biomasa

Los ensayos de caracterización experimental de las muestras de biomasa leñosa residual peruana se realizaron principalmente en las instalaciones del Laboratorio del Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Castilla - La Mancha, en Albacete, España, durante el periodo comprendido entre los meses de enero a marzo de 2020.

La evaluación experimental de las muestras representativas fue desarrollada de acuerdo con lo que establece la Norma Europea UNE-EN ISO 17225-2 [11], la cual comprende las pruebas para la determinación de las características físicas, químicas y energéticas de la biomasa leñosa.

Preparación de las muestras

Las muestras cortadas de eucalipto y pino se llevaron desde el Perú al laboratorio IER en España para su análisis. La preparación de la muestra es de gran importancia desde el punto de vista de la representatividad y homogeneidad de la misma. Con el propósito de garantizar estas dos cualidades, se desarrolló el procedimiento normalizado para la preparación de muestras de biocombustibles sólidos de acuerdo con la norma europea UNE-EN ISO 14780 [21]. Inicialmente, se reduce la masa de la muestra original a una o más porciones, mediante el método del cono y cuarteo, como se muestra la figura 1. De esta forma, se obtiene submuestras del tamaño necesario para su caracterización física.

Para la caracterización química y termoquímica, se requiere una submuestra con un tamaño de partícula inferior a 1 mm, para lo cual se utiliza un molino de cuchillas para su reducción a partes más pequeñas (molino marca Retsch modelo SM100) con tamices de hasta 0,5 mm, obteniendo un aserrín de 0,5 mm a 1,0 mm. Véase la figura 2. A estas submuestras, estabilizadas al aire durante al menos 24 horas en un recipiente abierto, se les denomina muestra de ensayo. Las porciones de ensayo para la determinación del poder calorífico se tomaron según la norma ISO 18135 [23].



Figura 1. Vista del método de cono y cuarteo para reducción de masa de muestra

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Vista del molino de cuchillas Retsch

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de propiedades fisicoquímicas de la muestra preparada

A. Determinación de densidad

Se determinaron los parámetros físicos más importantes como la dimensión de partícula, densidad de la partícula y densidad aparente. Estas propiedades determinan el sistema de alimentación que se debe emplear en el proceso de pelletización de la biomasa. Asimismo, la densidad aparente influye en el transporte y el almacenamiento del combustible sólido.

B. Determinación de la humedad

El procedimiento para determinar la humedad de la muestra consiste en calentar, de manera controlada, una porción de ensayo de 1,0 g a 105 °C hasta alcanzar una masa constante. Se considera que se ha alcanzado una masa constante cuando el cambio en la masa es inferior a 0,1 mg durante un periodo de calentamiento de 60 minutos. A continuación, la muestra se enfría a temperatura ambiente en un desecador. Las pruebas se realizan en un horno mufla marca Memmert modelo UNB 400, utilizando la Norma Técnica ISO 18134-3:2015 [19] e ISO 16993:2015 [13].

C. Caracterización química y termoquímica

a. Análisis elemental

Este análisis proporciona el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cloro y oxígeno en la muestra de ensayo, expresado en porcentaje en masa. El procedimiento utilizado para el análisis del C, H y N deriva de las normas ISO 18122:2015 [16] e ISO 16948:2015 [12]; mientras que el del S y del Cl deriva de la norma [20]. Para la determinación del contenido en carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre se utiliza un analizador elemental

marca LECO modelo TruSpec. Este equipo realiza la combustión en atmósfera altamente oxidante, de una cantidad de muestra entre 100 mg y 400 mg. Los gases de la combustión se dirigen a distintas celdas en las que se contabiliza individualmente el porcentaje de cada elemento. El contenido en carbono se determina mediante absorción en espectrofotómetro infrarrojo. El contenido en C, H y N se realizan en un mismo ensayo, mientras que el contenido en S se determina en un ensayo independiente en un módulo separado del citado equipo.

b. Análisis inmediato

Este análisis proporciona el contenido en volátiles, cenizas y carbono fijo de la muestra a analizar.

c. Determinación del contenido en volátiles

La materia volátil se determina contabilizando las pérdidas de masa que sufre una muestra de ensayo al ser calentada sin contacto con aire a 900 +/- 10 °C durante 7 minutos. El análisis se ha realizado según la Norma ISO 18123:2015 [18], utilizándose un horno mufla marca Hobersal Modelo 12pr/400 PAD.

d. Determinación del contenido en cenizas

El contenido en cenizas se determina a partir de la masa inicial y final de la muestra tras ser sometida a un proceso de calentamiento en atmósfera de aire en horno mufla. Se sigue el procedimiento establecido en la Norma ISO 18122:2015 [17] donde las rampas de calentamiento son 5 °C/min hasta alcanzar los 250 °C, Isoterma a 250 °C durante 60 minutos, luego 10 °C/min hasta alcanzar 550 +/- 10 °C y, finalmente, Isoterma a 550 °C durante 120 min. Tras someter la muestra a estas rampas, se vuelve a introducir en el horno a 550 °C durante periodos adicionales de 30 minutos hasta que el cambio de masa sea menor de 0,2 mg. Ver figura 6.

e. Determinación del contenido en carbono fijo

El contenido en carbono fijo se calcula como la diferencia entre el cien por cien del carbono en la muestra y los porcentajes de volátiles.

D. Poder calorífico

Experimentalmente, se usa un calorímetro marca PARR modelo 6100 para determinar el poder calorífico superior (PCS) a volumen constante de la muestra, expresado en las unidades del sistema internacional, kJ/kg. El PCS en base húmeda y en base seca, a volumen constante, se determinan a partir del resultado experimental y de una serie de expresiones que se detallan a continuación. El procedimiento seguido deriva de la norma ISO 18125:2017 [22].

a. Poder calorífico superior (PCS) a volumen constante en base húmeda

La muestra de ensayo se somete a una combustión con exceso de oxígeno en el calorímetro. A partir del incremento de temperatura que sufre el baño de agua donde está sumergida la bomba en la que se produce la combustión, el equipo determina el PCS a volumen constante de la muestra del ensayo (PCS_v) en base húmeda.

b. Poder calorífico superior (PCS) a volumen constante en base seca

El poder calorífico a volumen constante en base seca (PCS_{v,b,s}) se determina a partir del PCS_v y el porcentaje de humedad de la muestra de ensayo (M) según la ecuación (1).

$$PCS_{v,b,s} = \frac{PCS_v}{\left(1 - \frac{M}{100}\right)} \quad (1)$$

E. Proceso de pelletización de la biomasa

Para realizar la prueba, se utilizó una máquina de pelletizado de 2 HP, marca Ecofrío, ver figura 3. Para fines de esta investigación, se emplearon los términos y definiciones incluidos en la Norma ISO 16559:2022 [24]. Se pelletizó la muestra de biomasa de madera de eucalipto peruana en el equipo de laboratorio Ecofrío, y se obtuvo las condiciones preliminares de trabajo para el proceso de pelletizado a escala, para diferentes valores de grado de humedad, diámetro de los agujeros de entrada de la matriz y grado de compresión de la misma. De acuerdo con la norma de pelletizado ISO 17225-2:2014 [11], se estableció preliminarmente como condición óptima A1 aquella que proporciona un *pellet* de durabilidad igual o superior al 97,5 %, con una densidad aparente igual o superior a 600 kg/m³ y un contenido en finos inferior o igual al 1 %. También se establece como condición de calidad A1 que el *pellet* no debería contener un porcentaje en humedad superior al 10 %.



Figura 3. Vista del proceso de pelletizado de biomasa peruana con máquina de pelletizado de 2 HP, marca Ecofrío

Fuente: Elaboración propia.

F. Evaluación de la calidad del pellet producido

Se realizó mediante un análisis físico de durabilidad, densidad y contenido en finos. La durabilidad mecánica se determinó en el durabilímetro Mabrick, modelo DBM 203, mediante un ensayo de centrifugado donde la muestra de pellets se somete a golpes controlados en una cámara rotativa a 50 r. p. m. durante 10 minutos. Este ensayo se llevó a cabo de acuerdo con la Norma ISO 17831-1:2015 [16] (ver figura 4). Inicialmente, se eliminan los finos de la muestra mediante cribado manual con un tamiz de 3.15 mm de luz de paso, y se pesa la masa de pellets retenidos al inicio ($m_{bi, DU}$). Después, se somete la muestra al ensayo de centrifugado y se vuelve a hacer un cribado para separar los finos generados durante el proceso, anotando el peso del material final que no atraviesa la malla de 3.15 mm ($m_{bf, DU}$). De esta forma, la durabilidad (DU) expresa el porcentaje en masa, se calcula como la ecuación (2):

$$DU = \frac{m_{bf, DU}}{m_{bi, DU}} \cdot 100 \quad (2)$$



Figura 4. Vista del ensayo de la durabilidad mecánica de los pellets, con el durabilímetro marca Mabrick DBM 203

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la densidad aparente, se siguió el método descrito en la Norma ISO 17828:2015 [15] consistente en introducir la muestra en un recipiente de volumen (V) y masa (m_1) conocidos, para obtener el peso neto de la muestra por volumen normalizado, ver figura 5. Para llenar el recipiente, la muestra se deja caer desde una altura de 20 cm; después, este se deja caer contra el suelo dos veces para que el material se asiente y se rellena el espacio libre con más cantidad de muestra. El peso del recipiente lleno se denomina m_2 , valor con el que se calcula la densidad aparente (ρ_a) según la ecuación (3):

$$\rho_a = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3)$$



Figura 5. Vista del ensayo de densidad aparente de pellets, con recipiente normado

Fuente: Elaboración propia.

Comparación de los datos obtenidos con las normas internacionales

Con los resultados obtenidos, los cuales toman en cuenta los parámetros óptimos de control de calidad, es posible otorgar la categoría de calidad que le corresponde al pellet, siempre que cumpla con los requisitos de la norma ISO 17225-2:2014 [11]. Esta normativa sobre calidad de los biocombustibles sólidos es importante porque define indicadores de calidad y su valor límite para las distintas calidades de pellets de biomasa. Así, se facilita que los pellets de biomasa se consideren de calidad estándar, independientemente de su lugar de procedencia.

RESULTADOS

Caracterización de las muestras de biomasa: Determinación de las propiedades fisicoquímicas

A. Análisis elemental

Se obtuvieron los valores experimentales de C (49,93 %), N (0,44 %) y S (0,003 %) para los pellets obtenidos con muestras de eucalipto peruano, los cuales se presentan en la tabla 1 junto con los valores obtenidos para pino peruano (52,2 % para C, 0,41 % para N y 0,003 %). Los valores obtenidos en S para ambas especies coinciden con los valores establecidos en la norma [11] (ver tabla 2). El valor de C (52,2 %) obtenido para el pino es 2,27 % superior al obtenido para el eucalipto (49,93 %). Esto significa que el eucalipto es de menor calidad energética que el pino. Los valores del N (0,44 %) obtenidos para el eucalipto están 0,03 % por encima del valor obtenido para el pino (0,41 %), por lo que el eucalipto tendrá mayores emisiones de NOx y N₂O.

B. Caracterización energética de la biomasa

Para la caracterización energética de la biomasa, se determinó el PCS e inferior (PCI), expresado en MJ/kg, y el porcentaje de cenizas, siendo el PCI el valor utilizado comúnmente para definir el poder calorífico de un material de biomasa. Se determinó el PCI del árbol para muestras de sus diferentes materiales (corteza y madera), expresados como materia seca (porcentaje de humedad).

En la tabla 1, se aprecia que la madera de pino presentó el mayor PCI con 19,76 MJ/kg, seguido por la madera del eucalipto con 19,58 MJ/kg y, finalmente, la corteza del eucalipto con 16,45 MJ/kg.

En cuanto al porcentaje de cenizas, los resultados indicaron que la madera de eucalipto presenta un valor mayor (0,67 %) en comparación con la del pino (0,56 %). Se concluye que el eucalipto peruano tiene un porcentaje de cenizas menos favorable en comparación con el pino peruano, en relación con lo establecido por la Norma UNE-EN ISO 18122:2015 ($\leq 1,5$ %). Por tanto, la utilización del eucalipto peruano para producir

energía reduce en forma mínima la eficiencia de la combustión, ocasionando ligeramente mayores perjuicios en la combustión para las cocinas de uso rural ya explicados anteriormente.

Proceso de pelletizado de la biomasa

Los ensayos de pelletizado con biomasa leñosa peruana se han llevado a cabo con dos objetivos: por un lado, estudiar el proceso y sus variables más significativas, y, por otro, fabricar *pellets* para caracterizarlos y estudiar su comportamiento durante la combustión.

Tabla 1
Caracterización fisicoquímica de biomasa leñosa peruana realizada en el Instituto de Investigación de Energías Renovables de la UCLM, España

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Pino Madera
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 2	Madera 2	
Cenizas	% en masa	5,50	0,47	6,90	0,67	0,56
Sólidos volátiles	% en masa	76,71	85,23	73,87	84,73	76,71
Carbono fijo	% en masa	17,79	14,30	19,23	14,60	22,73
C (Carbono)	% en masa	47,12	50,95	45,97	49,93	52,20
H (Hidrógeno)	% en masa	5,18	5,39	5,10	5,69	5,82
N (Nitrógeno)	% en masa	0,56	0,50	0,62	0,44	0,41
S (Azufre)	% en masa	0,07	0,06	0,02	0,003	0,00
Cl (Cloro)	% en masa	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00
PCS	MJ/kg	17,97	19,75	17,57	19,59	19,75
PCI	MJ/kg	16,84	18,57	16,45	18,34	18,48

Fuente: Elaboración propia.

Las astillas de eucalipto peruano se muelen y pelletizan con el propósito de comparar las condiciones de molienda y compresión, así como la humedad y la velocidad de alimentación. A continuación, la tabla 2 muestra los requisitos establecidos por la norma ISO 17225-2:2014 [11], comparados con los resultados

obtenidos en esta investigación. Cabe mencionar que el valor de la densidad medida de 685,93 kg/m³, para la madera de eucalipto peruano, cumple con la densidad establecida en la norma ISO 17225-2:2014 [11], para una calidad de *pellets* A1 y A2 (≥ 600 kg/m³).

Tabla 2
Caracterización de pellets a partir de madera de eucalipto y pino peruano realizados en el Instituto de Investigación de Energías Renovables de la UCLM (España)

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Pino Madera de Pino
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 2	Madera 2	
Durabilidad mecánica	% en masa	-	94,38	-	95,02	97,08
Densidad a granel	kg/m ³	-	685,93	-	685,81	684,01
Humedad	% en masa	8,64	10,25	8,64	10,25	10,00
Finos	% en masa	-	< 1,0	-	< 1,0	3,15

Fuente: Elaboración propia.

En efecto, en la tabla 2, se evidencia que las cenizas de la biomasa de eucalipto peruano (0,47 %) y pino (0,56 %) cumplen con los valores máximos establecidos en la norma ISO 17225-2

($\leq 0,7$ %) de la tabla 3 para su uso como materia prima alternativa o de complemento en la fabricación de *pellets*.

Ensayo de combustión empleando pellets producidos en laboratorio

En la tabla 3, se presenta un resumen de los requisitos normativos y los estándares de valores límites establecidos por la norma ISO 17225-2:2014 [11], para las calidades de *pellets* A1, A2 y B, comparativamente con los resultados obtenidos en esta investigación. Según la norma, las clasificaciones A1 y A2 representan madera virgen y residuos de madera no tratada químicamente: la clase A1 de la tabla 2 alude a combustibles de

madera con bajo contenido en cenizas y nitrógeno, mientras que la clase A2 tiene algo más de cenizas y nitrógeno. La clase B permite el uso de subproductos y residuos industriales de madera tratada químicamente y madera no tratada químicamente, y su contenido de cenizas y nitrógeno es mayor. En este sentido, se considera que la clase A1 tiene un mayor valor comercial y ecológico porque su potencial de contaminación es menor. Las clases A2 y B tienen un mayor potencial de contaminación, y esa diferencia se refleja en sus menores precios de venta a nivel europeo.

Tabla 3
Especificaciones de *pellets* de madera clasificados para aplicaciones comerciales y residenciales

Clase de propiedad/ Método de análisis	Unidades	A1	A2	B
Origen y fuente, EN 17225-1		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1.1 Árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente ^a	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesamiento de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
Diámetro, D^b y longitud, L ISO 17829 Según la figura 1	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 < L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 < L ≤ 40
Humedad, M ISO 18134-1, ISO 18134-2	%(m/m) según se recibe, base húmeda	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Cenizas, A^d, ISO 18122	%(m/m) en base seca	A0.7 ≤ 0,7	A1.2 ≤ 1,2	A2.0 ≤ 2,0
Durabilidad mecánica, DU, ISO 17831-1	%(m/m) según se recibe	DU97.5 ≥ 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
Finos F^e, ISO 18846	%(m/m) según se recibe	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0	F1.0 ≤ 1,0
Aditivos^f	%(m/m) según se recibe	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad	≤ 2 A declarar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q, ISO 18125	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6	Q16.5 ≥ 16,5 o Q4.6 ≥ 4,6
Densidad a granel, BD^g, ISO 17828	kg/m ³ según se recibe	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600	BD600 ≥ 600
Nitrógeno, N, ISO 16948	%(m/m) en base seca	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
Azufre, S, ISO 16994	%(m/m) en base seca	S0.04 ≤ 0,04	S0.05 ≤ 0,05	S0.05 ≤ 0,05
Cloro, Cl, ISO 16994	%(m/m) en base seca	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03

Fuente: Clases de *pellets* de madera, ISO 17225-2:2014 [11].

Cabe mencionar que la densidad medida corresponde a las astillas leñosas de las especies peruanas consideradas (eucalipto y pino), donde se aprecia que las muestras de madera cumplen con una densidad igual o mayor a 600 kg/m³, con la excepción del eucalipto. Sin embargo, el proceso de la confección de pellets densifica el material por compresión; por lo tanto, el pelletizado de las astillas de la madera aumentará la densidad del pellet obtenido a partir de la madera de eucalipto peruano.

Según la tabla 3, se concluye que los *pellets* producidos a partir de biomasa de eucalipto peruano no alcanzan el valor mínimo de durabilidad mecánica (≥97,5 %) exigido para la categoría A1. En

contraste, los elaborados con madera de pino sí cumplen con este requisito, lo que los posiciona como una opción viable para su uso como materia prima alternativa o complementaria en la fabricación de pellets.

El contenido de cenizas en la biomasa de eucalipto (0,47 %) y pino (0,56 %) del Perú se ajusta a los límites establecidos por la norma (≤ 0,7 %), lo que permite que la madera de ambas especies pueda utilizarse como material complementario a las materias primas destinadas a estos fines.

Evaluación de la calidad del *pellet* producido

De acuerdo con la norma [11], se estableció como condición óptima aquella que proporciona un *pellet* con una durabilidad mecánica superior a 97,5 %, una densidad aparente superior a 600 kg/m³ y un contenido en finos inferior a 1%. Además, el *pellet* debe contener un porcentaje de humedad inferior al 10 %.

El valor de durabilidad mecánica obtenido para el eucalipto (94,38%) utilizando una pelletizadora doméstica de 2 HP, marca Ecofrío, fue inferior a lo establecido en la norma [11] para calidades A1 y A2 (≥97,5 %). Igualmente, el eucalipto peruano tampoco podría considerarse de calidad B (≥96,5 %), que es la categoría más baja.

El valor de la densidad a granel para el eucalipto (685,925 kg/m³) es superior a la densidad a granel del pino (684,01 kg/m³).

Con respecto a los valores de humedad obtenidos para la madera de eucalipto (10,25 %) y pino (10,0 %) peruanos, se concluye que el eucalipto no se ajusta a la normativa ISO de humedad (≤10,0 %) para su uso en la tolva de pelletizado, mientras que el pino peruano cumple justo con el límite permitido.

Determinación complementaria de las propiedades fisicoquímicas de las muestras de biomasa

Entre septiembre a octubre de 2021, se encargó al Laboratorio de Energías Renovables, Unidad de Biomasa Energética (LER-UBE) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, de Lima, Perú, la realización, en forma complementaria y simultánea, de las mismas pruebas fisicoquímicas realizadas en el IER-UCLM, España. Se realizaron coordinaciones entre ambos institutos de investigaciones de Perú y España las que produjeron resultados muy similares, como se evidencia en la tabla 4.

Tabla 4
Resultados de las pruebas fisicoquímicas de biomasa leñosa peruana, realizadas en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), Unidad de Biomasa Energética (UBE), Universidad Nacional Agraria la Molina (Unalm), Lima Perú

Parámetros	Unidad	Especie eucalipto				Madera de Pino
		Corteza 1	Madera 1	Corteza 1	Madera 1	
Cenizas	% en masa	6,07	0,52	6,90	0,67	0,18
Sólidos volátiles	% en masa	75,42	77,63	75,58	77,42	77,91
Carbono fijo	% en masa	17,79	14,30	19,23	14,60	22,73
C (Carbono)	% en masa	42,59	48,60	46,04	49,02	48,47
H (Hidrógeno)	% en masa	5,19	6,07	5,42	5,88	6,13
N (Nitrógeno)	% en masa	0,42	0,19	0,26	0,16	0,13
S (Azufre)	% en masa	0,071	0,047	0,037	0,043	0,029
Cl (Cloro)	% en masa	0,006	0,008	0,006	0,0007	0,005
PCS	MJ/kg	14,18	18,67	17,32	18,21	19,75
PCI	MJ/kg	13,84	16,51	15,28	15,90	18,48

Fuente: Elaboración propia.

En el LER-UBE de la Unalm, se realizó el análisis proximal de la muestra por triplicado para determinar el contenido de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo, en porcentaje en masa, utilizando el equipo analizador termogravimétrico TGA-701 LECO, de acuerdo con la norma norteamericana ASTM D7582.

Se realizó un pretratamiento de reducción de tamaño de partícula hasta pasar por tamiz N 60, y de secado en estufa a 105 °C durante 24 horas, antes de realizar los análisis en base seca. El análisis elemental en la Unalm se realizó por triplicado para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre en la muestra, en porcentaje en masa, utilizando el equipo analizador elemental CHN628 LECO, de acuerdo con la norma española [14].

El análisis de contenido energético en la muestra se realizó por triplicado para determinar el poder calorífico inferior (PCI) y el PCS utilizando el equipo calorímetro AC600 LECO, de acuerdo con la norma norteamericana ASTM D5865. Previamente, se ejecutaron los siguientes pretratamientos a la muestra: a) reducción de tamaño de partículas hasta pasar por tamiz N 60, y b) secado en estufa a 105 °C durante 24 horas.

El propósito de esta determinación complementaria, o doble caracterización, fue comparar la aplicación de la norma norteamericana ASTM con la norma europea ISO, ya que, en América Latina, generalmente, se utilizan las normas ASTM. Al contrastar los resultados obtenidos utilizando la norma ASTM en la tabla VII (resultados de la Unalm) con los obtenidos utilizando la Norma ISO (resultados en el IER-UCLM, tabla I), se observa que la variación es mínima. Asimismo, a partir de esta comparación, se podría afirmar que la norma europea es más estricta que la norteamericana por tener protocolos de análisis y pruebas más estandarizadas y exigentes que los de la norma americana.

CONCLUSIONES

De acuerdo con la norma ISO 17225-2 de calidad para la producción de *pellets* de biomasa, los parámetros determinados en *pellets* producidos a partir de muestras de eucalipto peruano obtuvieron valores que cumplieron con los estándares mínimos en contenido de nitrógeno, azufre y cloro, así como en PCI

y densidad a granel. Si bien los parámetros de durabilidad mecánica y humedad de la biomasa de eucalipto peruano no cumplen con los límites establecidos en la norma, la diferencia observada con los valores establecidos en la norma indicada es mínima.

Los resultados muestran una baja durabilidad mecánica de los pellets con eucalipto peruano, que no cumplen con la norma ISO mencionada. Sin embargo, solamente se realizó una prueba de durabilidad, cuyo valor variaría si se hubieran realizado varias pruebas.

Las cenizas de la biomasa de eucalipto peruano y pino cumplen con los valores máximos establecidos en la norma ISO para su uso como materia prima alternativa o de complemento en la fabricación de *pellets*.

La calidad de la madera depende principalmente de su nivel de humedad, por lo que debe secarse antes del análisis. Este es el caso de la muestra de biomasa de eucalipto peruano, cuyo contenido de humedad excede los límites establecidos por la norma ISO. Además, el exceso de humedad impacta negativamente en el proceso de combustión, haciéndolo más lento, reduciendo la eficiencia y provocando daños prematuros en los sistemas de alimentación de las cocinas de *pellets*.

Finalmente, se concluye que la biomasa residual del árbol de eucalipto de la localidad de San Francisco de Raymina tiene un alto potencial energético, y que su pelletización y aprovechamiento con fines energéticos es viable, y se posiciona como un combustible ecológico adecuado para uso doméstico.

REFERENCIAS

- [1] BVS MINSA. (2011). *Por un Perú sin humo. Campaña Nacional Medio Millón de Cocinas Mejoradas* [Archivo PDF]. <https://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/2782.pdf>
- [2] Castells, X. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- [3] Fernández-Puratich, H., Oliver-Villanueva, J. V., Valiente, M., Verdú, S., & Albert, N. (2014). Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions. *Madera y bosques*, 20(3), 97-111. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712014000300009&script=sci_abstract&tIng=en
- [4] Gonzáles Amao, W. (2018). *Construcción y caracterización de estufa con sistema de microgasificación*. [Tesis para obtener el grado académico de maestro en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética]. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ciencias. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/15990>
- [5] IDAE. (2007). *Energía de la Biomasa* [Archivo PDF]. https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10374_energia_de_la_biomasa_07_b954457c.pdf
- [6] Molina, J., Espinoza, R., Horn, M. & Gómez, M. (2019). Thermal performance evaluation of isolation and two active solar heating systems for an experimental module: A rural Peruvian case at 3700 masl. *Journal of Physics: Conference Series*, 1173(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1173/1/012003>
- [7] Pinto, R. (2018). *Identificación de los productos y medios empleados para el control de plagas*. SEAG0110. IC Editorial.
- [8] Portero, H. (2018). *Estudio experimental de pelletizado en planta piloto y de combustión en caldera de biomasa a baja potencia*. [Tesis para optar el grado de doctor]. Universidad de Castilla-La Mancha. Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. <https://hdl.handle.net/10578/18416>
- [9] Rojas Valdivia, A. (2004). *Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero forestal con mención en manejo de Recursos Forestales]. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de manejo de Recursos Forestales. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105033>
- [10] Sanchez, N. (2014). *Obtención de gas de síntesis a partir de biomasa utilizando catalizadores de níquel*. [Tesis para optar el grado en Ingeniería Química]. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. <https://acortar.link/LWR1iy>
- [11] Una Norma Española. (2014). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera (ISO 17225-2:2014)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053748>
- [12] Una Norma Española. (2015a). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno (ISO 16948:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055295>
- [13] Una Norma Española. (2015b). *Biocombustibles sólidos. Conversión de los resultados analíticos de una base a otra (ISO 16993:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055297>
- [14] Una Norma Española. (2015c). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido soluble en agua de cloruro, sodio y potasio (ISO 16995:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055053>
- [15] Una Norma Española. (2016a). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel (ISO 17828:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057270>
- [16] Una Norma Española. (2016b). *Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets (ISO 17831-*

1:2015). Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057456>

[17] Una Norma Española. (2016c). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de ceniza (ISO 18122:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056486>

[18] Una Norma Española. (2016d). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materia volátil (ISO 18123:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056450>

[19] Una Norma Española. (2016e). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 3. Humedad de la muestra para análisis general (ISO 18134-3:2015)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0056327>

[20] Una Norma Española. (2017). *Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro (ISO*

16994:2016). Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0057869>

[21] Una Norma Española. (2018a). *Biocombustibles sólidos. Preparación de muestras (UNE-EN ISO 14780:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060316>

[22] Una Norma Española. (2018b). *Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico (ISO 18125:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060319>

[23] Una Norma Española. (2018c). *Biocombustibles sólidos. Muestreo (ISO 18135:2017)*. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059669>

[24] Una Norma Española. (2022). *Biocombustibles sólidos. Vocabulario (ISO 16559:2022)*. Aenor. <https://tienda.aenor.com/norma-une-en-iso-16559-2022-n0070126>

ACERCA DEL AUTOR

Walter Gonzales Arnao

Es arquitecto, diseñador industrial y MSc. en Energías Renovables. Posee una certificación en Fabricación Digital en MIT en Boston. Asimismo, Es docente en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Tuvo una estancia de investigación en la Universidad Castilla - La Mancha, en el Instituto de Energías Renovable en la ciudad de Albacete, España. Inventor y experto en patentes. Docente investigador Renacyt, nivel II. Tiene publicaciones y patentes.

Para mayor información: <http://fabacademy.org/archives/2012/students/gonzales.walter/index.html>

 wgonzalesa@uni.edu.pe

Javier Verastegui Lazo

Ingeniero industrial por la UNI y Bachiller en Ingeniería Química por la UNMSM (Universidad Nacional de San Marcos). Obtuvo el DEA (equivalente a MSc) en Química Analítica y el doctorado en Química en la Universidad de París - Sorbona (antes U. Paris VI Pierre et Marie Curie), Francia. En Perú, ha sido director de Tecnología del Itintec, hoy Indecopi, y experto en Tecnología de la Junta del Acuerdo de Cartagena, hoy CAN. Entre 1991 y 2002, trabajó en Ottawa, Canadá, siendo gerente de Programas en la División de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID); luego, se desempeñó como coordinador para América Latina en el Instituto Canadiense de Biotecnología (CIB) y como secretario

ejecutivo de CamBioTec, la Iniciativa Canadá - América Latina para el Desarrollo Sustentable de la Biotecnología, bajo el auspicio del CIID. En 1998-1999, dirigió el Proyecto Bioseguridad y Percepción Pública en Biotecnología Agrícola en el Cono Sur para formación de capacidades en Argentina y Chile, auspiciado por la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI). En Perú, entre 2002 y 2007, ha sido sucesivamente coordinador nacional de la fase preparatoria del Programa de Ciencia y Tecnología (Fincyt 1), hoy ProInnovate, Director de Investigaciones y Jefe de la Oficina de Políticas en Ciencia y Tecnología del Concytec. De 2007 a 2009, ha sido secretario general de la Asociación BioEuroLatina en Madrid, España, donde dirigió el proyecto EULAFF «Acción Europa-América Latina en Alimentos Funcionales», auspiciado por la Comisión Europea. El Dr. Verástegui tiene una amplia experiencia en la enseñanza universitaria de postgrado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la UNI, Universidad Peruana Cayetano Heredia (UPCH), la UNMSM y la Universidad de San Martín de Porres (USMP). Tiene más de 30 publicaciones entre libros y artículos científicos. Asimismo, es consultor internacional en proyectos de gestión científico-tecnológica, gestión de la innovación, bioenergía, biodiversidad, biotecnología, y alimentos funcionales.

 verastegui.javier@gmail.com

Recibido: 19-02-24
 Revisado: 20-04-24
 Aceptado: 26-07-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Prototipo de columna vertebral en 3D

para el curso de Fundamentos de Ergonomía.



Transformando la educación: impacto de la impresión 3D en el proceso de enseñanza-aprendizaje en SST

Transforming education: impact of 3D printing on the teaching-learning process in OHS (Occupational Health and Safety)

RESUMEN

En la formación académica en seguridad y salud en el trabajo (SST), los métodos tradicionales resultan insuficientes para preparar adecuadamente a los estudiantes. La carencia de recursos interactivos limita la comprensión y aplicación práctica de conceptos críticos, afectando la capacidad de gestionar y comprender riesgos laborales de manera efectiva.

Frente a esto, nuestra investigación introduce la impresión 3D en la educación de seguridad y la salud en el trabajo (SST). Esta tecnología permite crear modelos tridimensionales precisos de estructuras anatómicas y dispositivos de seguridad, facilitando un aprendizaje práctico y tangible. Los estudiantes pueden manipular estos modelos, comprendiendo mejor los efectos de posturas y movimientos en la columna vertebral, así como el desarrollo de trabajos en altura que son considerados trabajos de alto riesgo.

Implementamos un prototipo de columna vertebral impreso en 3D para el curso de Fundamentos de Ergonomía. Los resultados muestran una mejora del 32,81 % en la comprensión de los conceptos ergonómicos y un incremento del 36,42 % en la retención del conocimiento. Además, se diseñó un módulo de andamios con piezas desmontables para el proceso de comprensión de montaje y desmontaje de andamios en el curso Trabajos de Alto Riesgo, demostrando un aumento del 36,39 % en la capacidad de los estudiantes para ejecutar estas tareas. Estos hallazgos subrayan el potencial de la impresión 3D para transformar la educación en SST.

ABSTRACT

In academic training in Occupational Safety and Health (OSH), traditional methods are insufficient to adequately prepare students. The lack of interactive resources limits the understanding and practical application of critical concepts, affecting the ability to effectively manage and understand occupational hazards.

Against this backdrop, our research introduces 3D printing in Occupational Safety and Health (OSH) education. This technology enables the creation of accurate three-dimensional models of anatomical structures and safety devices, facilitating hands-on, tangible learning. Students can manipulate these models, better understanding the effects of postures and movements on the spine, as well as the development of work at heights that are considered high-risk jobs.

We implemented a 3D printed spine prototype for the Fundamentals of Ergonomics course. The results show a 32,81% improvement in the understanding of ergonomic concepts and a 36,42% increase in knowledge retention. In addition, a scaffolding module with detachable parts was designed for the process of understanding scaffolding assembly and disassembly in the High Risk Work course, demonstrating a 36,39% increase in students' ability to execute these tasks. These findings underscore the potential of 3D printing to transform OSH education.



Palabras Claves

Impresión 3D, educación superior, seguridad y salud en el trabajo, ergonomía, columna vertebral, andamios, trabajos en altura, trabajos de alto riesgo, innovación educativa, metodología de enseñanza, aprendizaje interactivo, innovación en SST, prototipos educativos en 3D, simulación.

Key words

3D Printing, Higher Education, Occupational Health and Safety, Ergonomics, Spine, Scaffolding, Work at height, High Risk Jobs, Educational Innovation, Teaching Methodology, Interactive Learning, Innovation in SST, 3D Educational Prototypes, Simulation.

INTRODUCCIÓN

Para preparar a los estudiantes para la complejidad del mercado laboral actual, es esencial incorporar herramientas de enseñanza innovadoras en el cambiante panorama de la educación superior. La seguridad y salud en el trabajo (SST) no es una excepción, pues demanda profesionales con conocimientos teóricos y habilidades prácticas en la implementación de medidas de seguridad.

Este estudio explora cómo los módulos didácticos con fabricación digital creados por docentes pueden mejorar la experiencia de aprendizaje. Dichos módulos, que incluyen modelos impresos en 3D, prototipos cortados con láser y simulaciones modeladas por computadora, ofrecen a los estudiantes herramientas interactivas que representan desafíos y soluciones de seguridad del mundo real.

Investigaciones previas destacan la efectividad de la impresión 3D en la educación [18]. Por ejemplo, se ha demostrado que los modelos impresos en 3D mejoran significativamente la comprensión de estructuras anatómicas complejas en estudiantes de medicina. Asimismo, integrar la impresión 3D e Industria 4.0 en la enseñanza de la ingeniería facilita la comprensión de teorías y conceptos clave [9], y mejora las habilidades de dibujo en 3D, optimizando la retención de conocimientos y la capacidad para aplicar conceptos teóricos en contextos prácticos.

El uso de material didáctico creado con impresoras 3D permite desarrollar prototipos, investigar diseños y visualizar componentes y procesos, lo cual enriquece la enseñanza en disciplinas como medicina e ingeniería biológica [8]. Esta tecnología también se aplica en otros campos, como la ergonomía [12]. En el currículo de SST, se promueve un enfoque práctico donde los estudiantes manipulan, analizan y rediseñan material didáctico para explorar distintos escenarios de seguridad, convirtiéndose en participantes activos del aprendizaje. Los proyectos de impresión 3D desarrollan habilidades como la resolución de problemas, el aprendizaje autodirigido y el pensamiento crítico [3], además de promover una comprensión más profunda a través de la interacción.

Los estudios revisados indican que la impresión 3D mejora el aprendizaje de ciencia y tecnología mediante la enseñanza, demostración, apoyo docente y desarrollo de tecnologías avanzadas [22].

Los docentes pueden mejorar la calidad de la enseñanza al permitir enfoques innovadores en sus sesiones [8]. La impresión 3D también beneficia a los docentes al enriquecer el entorno educativo, integrando diversos enfoques metodológicos [2]. Al adaptar los módulos a las últimas normativas, avances tecnológicos y cambios regulatorios, se asegura que los estudiantes reciban información actualizada y relevante.

Este estudio examina cómo los docentes han implementado con éxito módulos de fabricación digital diseñados en impresoras 3D (Fab Lab), analizando las dificultades, oportunidades y métodos para maximizar los beneficios educativos. Las tecnologías de impresión 3D fortalecen la motivación y refuerzan las competencias necesarias en el proceso educativo [19]. Finalmente, el artículo ofrece sugerencias para educadores interesados en innovar en la enseñanza de SST.

FUNDAMENTOS

La integración de la impresión 3D en la educación puede mejorar los procesos educativos al proporcionar recursos innovadores en diversas disciplinas académicas [21], especialmente en el campo de seguridad y salud en el trabajo (SST), donde ha despertado creciente interés en la comunidad académica.

Esta tecnología no solo permite crear modelos tridimensionales precisos, sino que también es una herramienta eficaz para mejorar la comprensión y aplicación práctica de conceptos clave en SST.

Comparación con enfoques tradicionales y tecnologías alternativas

Tradicionalmente, la formación en seguridad y salud en el trabajo (SST) ha recurrido a métodos convencionales, como libros de texto, presentaciones y simulaciones en 2D. Aunque valiosos, estos métodos suelen ser limitados en interactividad y en la representación de escenarios complejos. Diversos estudios señalan que los métodos tradicionales pueden ser insuficientes para brindar una comprensión profunda y práctica de los riesgos laborales [1].

Ventajas de la tecnología de impresión 3D

La impresión 3D ofrece una ventaja significativa al proporcionar modelos físicos que los estudiantes pueden manipular, fomentando la creatividad y motivándolos a participar activamente en clase [3]. Al representar con precisión estructuras anatómicas, como la columna vertebral, y elementos de seguridad, esta tecnología facilita un aprendizaje más tangible y participativo. Recientes investigaciones han demostrado que los modelos tridimensionales mejoran la comprensión y retención del conocimiento frente a los métodos tradicionales [16]. Además, la impresión 3D permite desarrollar recursos didácticos innovadores en áreas como informática, programación y diseño de productos [5].

La investigación de Karsenty *et al.* (2021) muestra que el uso de modelos impresos en 3D para enseñar cardiopatías congénitas mejora tanto el desempeño como la comprensión de los estudiantes en comparación con métodos tradicionales. A pesar de algunas limitaciones, estos modelos se consolidan como herramientas valiosas en la educación médica, destacando su efectividad para facilitar el aprendizaje de diversos conceptos [11].

Perspectivas de otros autores

Investigaciones sobre impresión 3D en la educación: Varios estudios han destacado los beneficios de la impresión 3D en la educación técnica y científica. Un estudio de De la Cruz-Campos *et al.* (2022) indica que las experiencias educativas con impresión 3D logran resultados significativos a través de la experimentación operativa, el fomento de la motivación y mejores resultados académicos. Los estudiantes aprenden experimentando y disfrutando, lo que despierta en ellos el deseo de adquirir conocimientos aplicables tanto en el ámbito profesional como en el personal [7]. La posibilidad de crear modelos físicos que los estudiantes pueden manipular y examinar en detalle supera las limitaciones de los recursos educativos tradicionales.

Ventajas de la tecnología de impresión 3D

La impresión 3D puede aplicarse a tareas como el diseño y prueba de prototipos y productos finales. En ingeniería y diseño, es fundamental disponer de materiales didácticos que presenten problemas y situaciones reales, permitiendo a los estudiantes interactuar, analizar y responder de manera práctica, promoviendo la educación experiencial y superando la unilateralidad en la transmisión de información [4].

A pesar de sus beneficios, como el fomento de habilidades prácticas y el aumento del interés en disciplinas STEM¹, la implementación actual de la impresión 3D sigue siendo incipiente, lo que destaca la necesidad de más investigaciones y políticas educativas que faciliten su adopción [14]. Aunque la impresión 3D es una tecnología avanzada, aún presenta limitaciones que dificultan su uso generalizado. Se requiere un estudio más profundo para predecir parámetros clave del proceso, optimizando la transición del diseño al producto final y simplificando el proceso sin necesidad de información adicional sobre el objeto impreso [17].

Comparación con simulaciones virtuales

Si bien las simulaciones virtuales ofrecen experiencias interactivas, Smith *et al.* (2020) destacan que los modelos impresos en 3D añaden una dimensión de interacción física, crucial para comprender conceptos complejos [20]. La integración de simulaciones virtuales y modelos físicos en el aula proporciona una experiencia de aprendizaje más completa, permitiendo a los estudiantes explorar conceptos teóricos de manera práctica y visual, lo cual facilita una comprensión más profunda [23]. Esta combinación fomenta la interactividad y el compromiso, aumentando el interés y la retención del conocimiento en los estudiantes.

Beneficios en seguridad y la salud en el trabajo (SST)

En el ámbito de seguridad y salud en el trabajo, Johnson y Lewis (2021) evidencian que la impresión 3D mejora significativamente la formación práctica. Los modelos tridimensionales permiten a los estudiantes configurar equipos de seguridad y practicar procedimientos de emergencia en un entorno controlado, optimizando su preparación para situaciones reales [10].

El uso de modelos 3D de objetos naturales en la educación superior mejora la calidad, accesibilidad y visibilidad del material de estudio, potenciando el desarrollo del pensamiento espacial en los estudiantes. La integración de estas tecnologías en la educación ambiental digital es crucial para formar una nueva generación de especialistas en industrias como la ecología y la industrial, facilitando la comprensión mediante una visualización efectiva [15].

Khurma *et al.* (2023) examinan la incorporación de la impresión 3D en la educación STEM en escuelas primarias de los Emiratos Árabes Unidos, destacando la percepción positiva de estudiantes y docentes. El uso de la impresión 3D no solo facilita la comprensión de conceptos abstractos, sino que también incrementa el interés y las actitudes de los estudiantes hacia carreras STEM [13]. Sin embargo, se señalaron obstáculos como la escasez de tiempo y la falta de capacitación para los educadores, lo que sugiere la

necesidad de formación y recursos adecuados para maximizar sus beneficios. Se observó, además, que un mayor nivel de integración de la impresión 3D en módulos didácticos predice positivamente el interés de los estudiantes en carreras STEM, tanto en áreas analíticas como empáticas [6].

Aplicación en la educación superior

La implementación de la impresión 3D en los cursos de Trabajos de Alto Riesgo y Fundamentos de Ergonomía ha mostrado un impacto positivo en el aprendizaje. Comparado con estudios previos, nuestros resultados indican un aumento en la comprensión y retención del conocimiento, así como una mejora en las habilidades prácticas. El uso de modelos impresos en 3D, como la columna vertebral y módulos de andamios, permite a los estudiantes interactuar de manera más efectiva con los materiales educativos que los métodos tradicionales.

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación emplea un enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar el impacto de la impresión 3D en el aprendizaje de seguridad y salud en el trabajo (SST). Se aplicaron un pretest y un postest a un solo grupo de estudiantes de los cursos de Trabajos de Alto Riesgo y Fundamentos de Ergonomía en una institución de educación superior.

El objetivo fue medir el impacto de los módulos didácticos impresos en 3D en la comprensión y retención de conocimientos ergonómicos, así como en la capacidad de los estudiantes para realizar tareas prácticas de montaje y desmontaje de andamios.

Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación es descriptivo-explicativo; no solo busca describir el fenómeno observado, sino también explicar las causas y efectos de la intervención educativa basada en impresión 3D en el aprendizaje de seguridad y salud en el trabajo (SST), abarcando los siguientes aspectos:

Descriptivo

Descripción de la intervención

En la fase descriptiva, la investigación detalla las características y resultados de la implementación de los módulos didácticos impresos en 3D. Se busca describir el nivel de comprensión de conceptos ergonómicos y las habilidades de montaje y desmontaje de andamios en los estudiantes antes y después de la intervención. Para ello, se recopilaron datos cuantitativos mediante pretest y postest, y datos cualitativos a través de encuestas de satisfacción a estudiantes y docentes.

Explicativo

En la fase explicativa, se busca entender las razones detrás de los resultados observados, analizando cómo y por qué el uso de modelos impresos en 3D mejora la comprensión y retención de conocimientos ergonómicos y las habilidades prácticas en comparación con los métodos tradicionales. Se examinarán los mecanismos mediante los cuales los modelos 3D impactan el aprendizaje, como el aumento de la interacción física con los

1 STEM: Science, Technology, Engineering and Mathematics (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas)

conceptos, la visualización tridimensional de estructuras complejas y la posibilidad de realizar prácticas repetitivas sin riesgos.

Qué incluye el alcance

- A. Evaluación de la efectividad de los modelos 3D** Medir el cambio en la comprensión de conceptos ergonómicos y en las habilidades de montaje y desmontaje de andamios a través de pruebas pretest y postest. Analizar los incrementos porcentuales en los resultados para evaluar la mejora en el rendimiento académico de los estudiantes.
- B. Percepción de la intervención:** Recoger y analizar las percepciones de estudiantes y docentes sobre la efectividad y utilidad de los modelos impresos en 3D en la enseñanza de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST).
- C. Identificación de factores de éxito:** Determinar los aspectos específicos de la intervención que contribuyen significativamente a la mejora del aprendizaje, como la interacción tangible con los modelos y la visualización tridimensional de estructuras.
- D. Generación de conocimientos para futuras aplicaciones:** Proporcionar un marco teórico y empírico que sirva para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la educación de SST y áreas afines.

En resumen, esta investigación busca describir detalladamente los resultados de la implementación de modelos 3D en la educación de SST y explicar las razones de su efectividad, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en los métodos de enseñanza en esta área.

MÉTODOS

La metodología de esta investigación se centra en la implementación y evaluación de modelos impresos en 3D en el proceso de enseñanza-aprendizaje en los cursos de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST). Este proceso se dividió en varias fases clave:

Técnicas y herramientas

- **Impresión 3D:** Creación de modelos tridimensionales precisos, como la columna vertebral y andamios desmontables.
- **Encuestas y entrevistas:** Recolección de datos cualitativos para obtener retroalimentación de los estudiantes.
- **Evaluaciones cuantitativas:** Pruebas pre- y postintervención para medir el conocimiento y la retención.
- **Análisis estadístico:** Comparación de los resultados de las evaluaciones para determinar la efectividad de la intervención.

DESARROLLO DE MATERIALES DIDÁCTICOS

A. Creación de prototipos: Diseño y producción de modelos tridimensionales mediante impresión 3D:

- **Columna vertebral:** Prototipo impreso en 3D para enseñar conceptos ergonómicos.

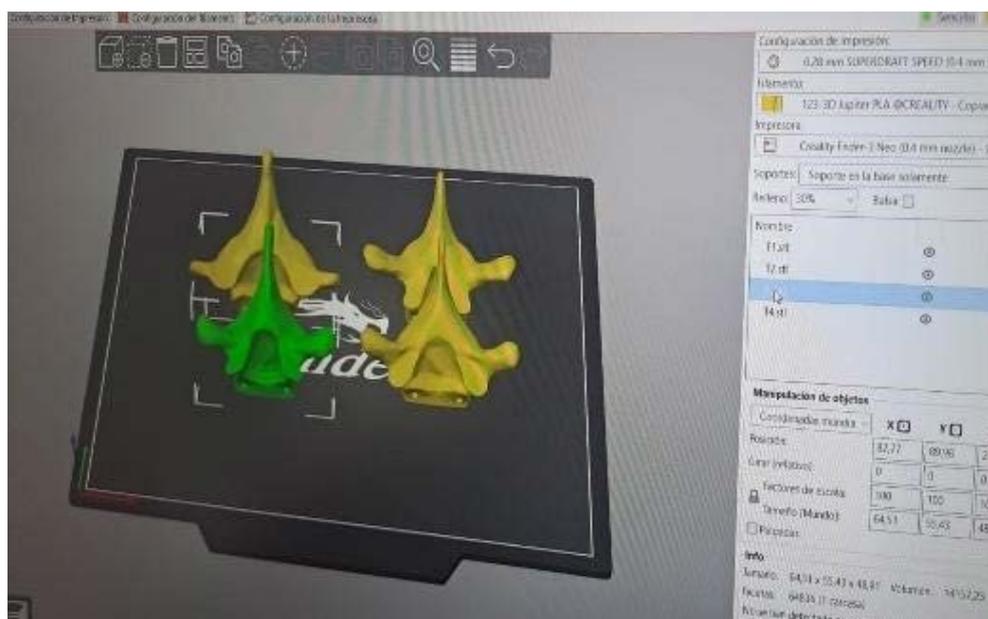


Figura 1. Diseño de prototipo de columna. Elaboración propia.

La figura anterior muestra la configuración en un software de impresión 3D para el modelo de vértebras, con cuatro vértebras alineadas y los parámetros de impresión optimizados.

Para crear el modelo de la columna vertebral, se utilizó una impresora 3D de alta precisión con tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). El diseño se realizó con software de diseño asistido por computadora (CAD) y se imprimió con filamento de ácido poliláctico (PLA), un material biodegradable y resistente.



Figura 2. La impresora 3D Ender en proceso de impresión de modelos de vértebras visibles sobre la plataforma. El filamento, colocado en la parte superior de la máquina, está listo para alimentar la impresora

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Posicionamiento del prototipo utilizando una plantilla para alinear correctamente las vértebras en su ubicación anatómica y colocación de piezas en una prenda

Fuente: Elaboración propia.

- **Andamios:** Modelo de andamio impreso en 3D con piezas desmontables, diseñado para enseñar técnicas de montaje y desmontaje.



Figura 4. Impresora 3D Ender en proceso de fabricación de piezas de andamio a escala, utilizando filamento PLA de la marca eSUN

Fuente: Elaboración propia.

Validación de modelos: Los modelos fueron validados por expertos en Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) para garantizar su precisión y relevancia educativa.

IMPLEMENTACIÓN DEL ESTUDIO

Participantes: Estudiantes de la carrera de Seguridad y Salud en el Trabajo: la muestra del estudio consistió en 130 estudiantes matriculados en los cursos de Trabajos de Alto Riesgo y Fundamentos de Ergonomía, seleccionados mediante muestreo por conveniencia.

Procedimiento: Los estudiantes interactuaron con los modelos impresos en 3D durante las sesiones prácticas del curso.

- **Aplicación del pretest:** Aplicado para establecer el nivel inicial de conocimientos.
- **Intervención:** Talleres prácticos utilizando modelos 3D.
- **Aplicación del postest:** Evaluó la mejora en la comprensión y habilidades prácticas.
- **Encuestas de satisfacción:** Administradas al finalizar la intervención.

Aplicación del prototipo de columna

Aplicación de las sesiones con apoyo visual de diapositivas y el uso de prototipos impresos en 3D.



Figura 5. Capacitación en ergonomía con el prototipo de vértebras de la columna junto a los estudiantes.

Fuente: Elaboración propia.

Este modelo tridimensional permite a los estudiantes visualizar y manipular una representación precisa de la columna vertebral humana.



Figura 6. Demostración práctica utilizando el modelo de columna vertebral sobre la espalda de un participante. Algunos estudiantes seleccionados emplearon el prototipo para realizar la demostración

Fuente: Elaboración propia.

La interacción con este modelo facilita la comprensión de los efectos de distintas posturas y movimientos en la columna, promoviendo un aprendizaje práctico y tangible de conceptos ergonómicos. Esto refuerza el conocimiento anatómico de los estudiantes y les ayuda a comprender la importancia de una postura adecuada en el entorno laboral.



Figura 7. El prototipo se utilizó para que los estudiantes visualizaran el movimiento de las vértebras al levantar una carga de forma incorrecta

Fuente: Elaboración propia.



Figura 8. El prototipo se utilizó para visualizar la posición de las vértebras al levantar una carga de manera correcta

Fuente: Elaboración propia.

Aplicación del prototipo de andamio a escala

Aplicación de las sesiones utilizando el prototipo del andamio para reforzar los conceptos.



Figura 9. Los estudiantes realizaron el montaje y desmontaje de un andamio impreso a escala

Fuente: Elaboración propia.

Este modelo, utilizado como material didáctico y compuesto por piezas desmontables, permite a los estudiantes aprender y practicar el montaje y desmontaje de andamios de forma segura y efectiva, reduciendo así la exposición a peligros y riesgos asociados con el uso de andamios reales.



Figura 10. Demostración de la importancia de dominar las técnicas de montaje y desmontaje de andamios

Fuente: Elaboración propia.

El modelo simula un andamio real, ofreciendo una experiencia educativa práctica sin los riesgos asociados al uso de andamios a gran escala. Los estudiantes pueden practicar la secuencia correcta de montaje y desmontaje, mejorando su habilidad para realizar estas tareas en situaciones reales.



Figura 11. Participación activa y colaborativa de los estudiantes durante la actividad

Fuente: Elaboración propia.

RECOLECCIÓN DE DATOS

- **Pretest y postest:** Evaluaron la comprensión de conceptos ergonómicos y la capacidad de montaje y desmontaje de andamios antes y después de la intervención.
- **Encuestas de satisfacción:** Recopilaron las percepciones de estudiantes y docentes sobre la efectividad de los modelos 3D.

Análisis de datos

Cuantitativo

Se realizó un análisis estadístico de las puntuaciones obtenidas en las evaluaciones para determinar el aumento en la comprensión y retención del conocimiento.

Tabla 1
Cuadro de estadísticos descriptivos

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas		
	Variable 1	Variable 2
Media	13,1769	17,98461538
Varianza	2,9685	2,681932021
Observaciones	130,0000	130
Coefficiente de correlación de P	0,5697	
Diferencia hipotética de las medias	0,0000	
Grados de libertad	129,0000	
Estadístico t	-35,1241	
P(T<=t) una cola	0,0000	
Valor crítico de t (una cola)	1,6568	
P(T<=t) dos colas	0,000000	
Valor crítico de t (dos colas)	1,9785	

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran una diferencia significativa entre las medias de las dos variables ($p < 0,001$) y una correlación moderada ($r = 0,57$), lo que sugiere una relación positiva que merece un análisis más profundo de los factores involucrados. La tabla presenta los resultados de una prueba t para medias de dos muestras emparejadas, utilizada para comparar las medias de dos conjuntos de datos emparejados y determinar si existe una diferencia significativa entre ellas. A continuación, se ofrece una interpretación detallada de los resultados:

A. Estadísticas descriptivas

- **Media:** La media de la variable 1 es 13,1769, mientras que la de la variable 2 es 17,9846, lo que indica que, en promedio, los valores de la variable 2 son más altos que los de la variable 1.

- **Varianza:** La varianza de la variable 1 es 2,9685 y la de la variable 2 es 2,6819, mostrando una variabilidad similar en ambas muestras.
- **Observaciones:** Ambas variables cuentan con 130 observaciones.

B. Correlación

- **Coefficiente de correlación de Pearson:** El coeficiente de correlación es 0,5697, indicando una correlación positiva moderada entre las dos variables.

C. Prueba t

- **Diferencia hipotética de las medias:** La diferencia hipotética es 0, lo que significa que se está evaluando si no hay diferencia entre las medias de las dos variables.
- **Estadístico t:** El valor del estadístico t es -35,1241, indicando una diferencia significativa entre las dos medias.
- **P(T<=t) una cola:** El valor p para una prueba de una cola es 0,0000, lo que indica que la diferencia es significativa en una dirección.
- **Valor crítico de t (una cola):** El valor crítico de t para una cola es 1,6568.
- **P(T<=t) dos colas:** El valor p para una prueba de dos colas es 0,000000, lo que sugiere una diferencia altamente significativa entre las medias de las dos variables.
- **Valor crítico de t (dos colas):** El valor crítico de t para dos colas es 1,9785.

Los resultados muestran una diferencia significativa entre las medias de la Variable 1 y la Variable 2. Con un valor p de 0,0000 (una cola) y 0,000000 (dos colas), podemos rechazar la hipótesis nula de que no hay diferencia entre las medias, aceptando la hipótesis alternativa de que sí existe una diferencia significativa entre los resultados del pretest y el postest.

Estos hallazgos son consistentes con los datos del resumen de la investigación, que indican una mejora significativa en la comprensión y retención del conocimiento al utilizar los modelos didácticos impresos en 3D.

Cualitativo

Se realizó un análisis temático de las respuestas de encuestas y entrevistas para identificar patrones y percepciones comunes sobre el uso de modelos 3D.

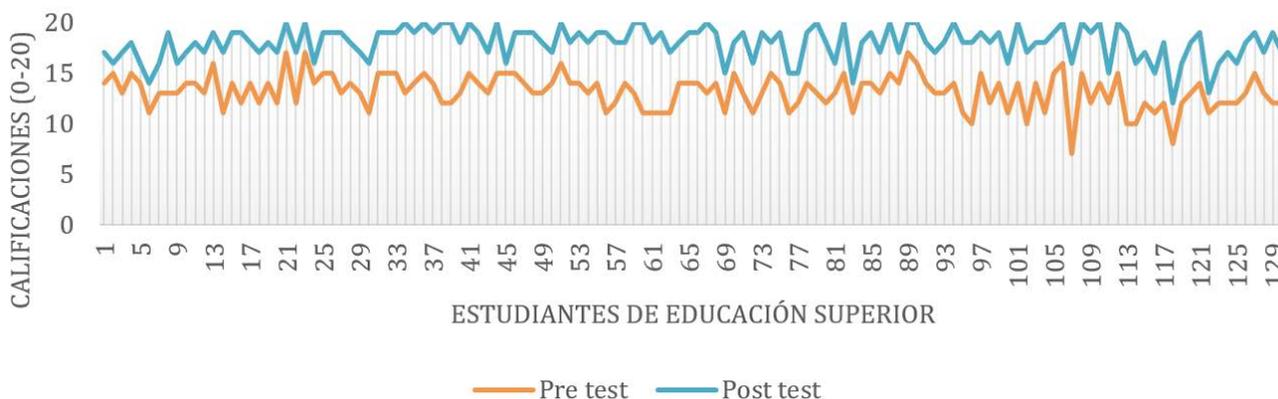


Figura 12. Comparación de las calificaciones de los estudiantes en el pretest y posttest, mostrando una diferencia significativa en los resultados
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra los resultados de la evaluación de conocimientos, evidenciando una tendencia hacia puntajes más altos en el posttest en comparación con el pretest. Este aumento significativo sugiere una mejora sustancial en la comprensión y retención de la información.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Comparación con datos

Comparación de los promedios obtenidos por los estudiantes en las pruebas de pretest y posttest.

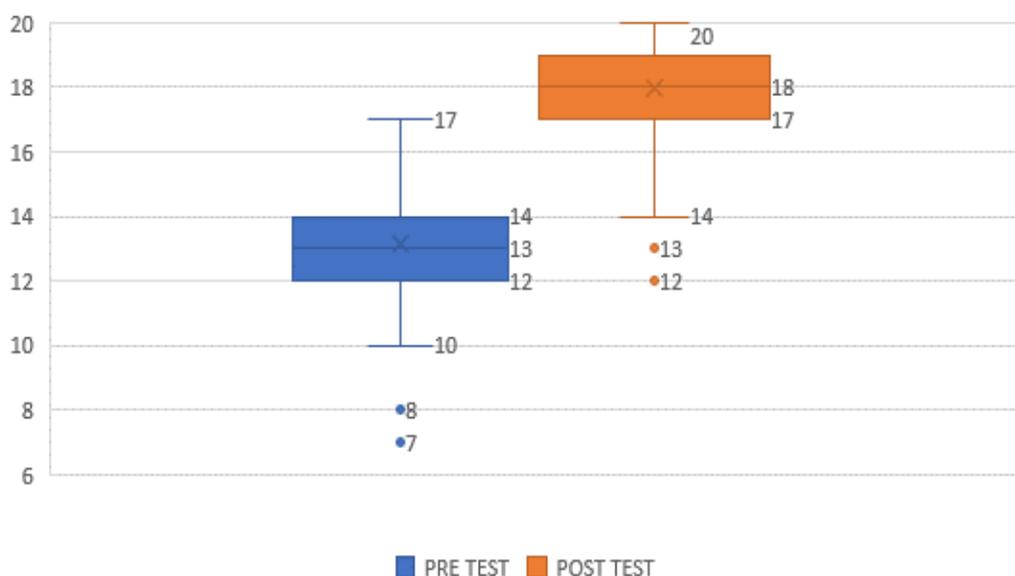


Figura 13. Resultados de las evaluaciones realizadas antes y después de la clase, utilizando módulos didácticos impresos en 3D
Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra los promedios obtenidos en la evaluación de conocimientos, comparando el pretest y el posttest, y evidenciando una mejora significativa en los conocimientos adquiridos. La nota promedio aumentó de 13 en el pretest a 18 en el posttest.

Percepción docente

La implementación de modelos didácticos impresos en 3D en las sesiones de clase fue evaluada mediante una encuesta específica aplicada a docentes de educación superior técnica. Los resultados y comentarios obtenidos brindan una visión valiosa sobre la efectividad y los beneficios de esta innovación educativa.

Resultados de la encuesta

La encuesta aplicada a los docentes incluyó preguntas sobre diversos aspectos de la implementación, como la utilidad de los modelos en la enseñanza, la facilidad de integración en el plan de estudios y la percepción de mejora en el aprendizaje de los estudiantes. A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

Primera pregunta: El 66 % de los docentes respondió que no han utilizado previamente módulos didácticos en fabricación digital (como material didáctico en 3D), lo que indica que la tecnología de impresión 3D aún no ha sido ampliamente explorada en su contexto educativo y presenta una oportunidad

para introducir nuevas metodologías. El 34 % restante afirmó haberlos utilizado, lo cual sugiere que algunos docentes están ya a la vanguardia en la adopción de innovaciones tecnológicas en educación.

Segunda pregunta: El 90 % de los docentes consideró que sería «muy fácil» o «fácil» integrar módulos didácticos en 3D en su plan de clases, mientras que el 10 % adoptó una postura neutral. Esto refleja una percepción optimista hacia la incorporación de esta tecnología y sugiere que, con el apoyo adecuado, la integración puede ser exitosa.

Tercera pregunta: El 90 % de los docentes considera que los módulos didácticos en 3D ayudarían a los estudiantes a retener mejor la información, mientras que el 10 % indicó que ayudarían de forma moderada. La mayoría tiene una percepción positiva sobre el impacto de estos módulos en la retención de conocimientos, destacando que su naturaleza interactiva y visual podría facilitar una mejor asimilación de los contenidos.

Cuarta pregunta: El 96 % de los docentes cree que sería «muy útil» o «útil» utilizar un prototipo de columna vertebral para enseñar ergonomía y posturas correctas, mientras que el 4 % tiene una opinión neutral. Esto muestra un fuerte respaldo hacia el uso de esta herramienta en la enseñanza de ergonomía.

Quinta pregunta: El 98 % de los docentes cree que sería «muy útil» o «útil» utilizar módulos didácticos en 3D en la enseñanza

de su materia, con un 2 % en posición neutral. Estos resultados reflejan una percepción positiva sobre la utilidad de los módulos 3D, destacando su potencial para mejorar la comprensión de los estudiantes.

Sexta pregunta: El 100 % de los docentes expresó interés en implementar módulos 3D en sus cursos. Este interés generalizado subraya la disposición de los docentes para innovar en sus metodologías de enseñanza y experimentar con nuevas herramientas tecnológicas.

Comentarios de los docentes

Además de las respuestas cuantitativas, los docentes proporcionaron comentarios cualitativos que destacan tanto los beneficios como algunos desafíos encontrados:

- «Los modelos impresos en 3D han transformado la forma en que enseñamos conceptos ergonómicos. Los estudiantes pueden ver y tocar lo que antes solo podían imaginar».
- «La capacidad de desmontar y volver a montar los modelos proporciona una experiencia de aprendizaje interactiva que no se puede replicar con métodos tradicionales».

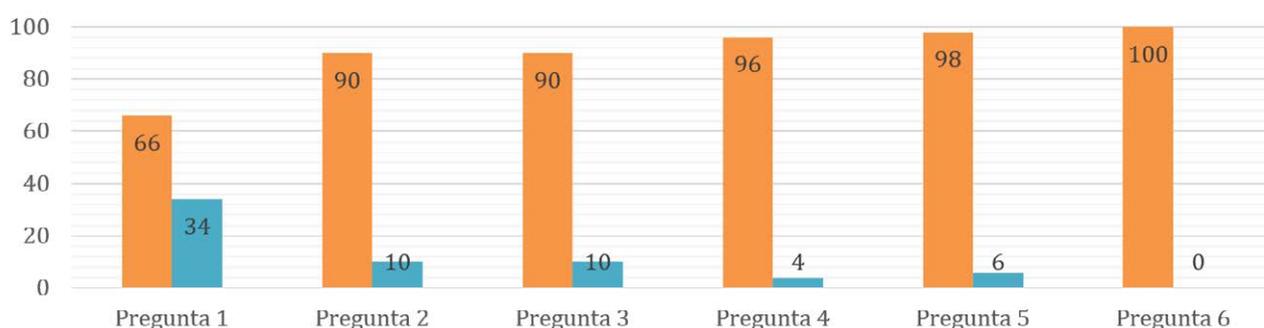


Figura 14. Análisis de los resultados del cuestionario aplicado a los docentes

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Resultados

Los resultados indican que la implementación de modelos didácticos impresos en 3D tiene un impacto positivo significativo en el aprendizaje de los estudiantes en el área de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST). El aumento del 32,81 % en la comprensión de conceptos ergonómicos, del 36,42 % en la prueba de conocimientos y del 36,39 % en la capacidad de montaje y desmontaje de andamios sugiere que estos módulos interactivos facilitan una mejor asimilación de conceptos teóricos y prácticos esenciales.

Cálculo de los incrementos porcentuales

Los incrementos porcentuales se calcularon utilizando la fórmula:

$$I. de (\%) = \left(\frac{\text{Postest promedio} - \text{pretest promedio}}{\text{Pretest promedio}} \right) \times 100$$

Interpretación de resultados

A. Mejora en la comprensión

Los estudiantes mostraron una mejora del 32,81 % en la comprensión de conceptos ergonómicos tras utilizar los modelos impresos en 3D.

- Pretest promedio: 6,4
- Postest promedio: 8,5

$$\text{Incremento. de (\%)} = \left(\frac{8,5 - 6,4}{6,4} \right) \times 100 = 32,81 \%$$

B. Incremento en la retención del conocimiento

Se observó un incremento del 36,42 % en la retención del conocimiento en la prueba que incluía preguntas sobre conceptos ergonómicos y el montaje y desmontaje de andamios.

- Pretest promedio: 13,18
- Posttest promedio: 17,98

$$\text{Incremento. de (\%)} = \left(\frac{17,98 - 13,18}{13,18} \right) \times 100 = 36,42 \%$$

C. Habilidades prácticas mejoradas

Los estudiantes demostraron un aumento del 36,39 % en su capacidad para montar y desmontar andamios tras interactuar con los modelos impresos en 3D.

- Pretest promedio: 6,76
- Posttest promedio: 9,22

$$\text{Incremento. de (\%)} = \left(\frac{9,22 - 6,76}{6,76} \right) \times 100 = 36,39 \%$$

LIMITACIONES

Muestra limitada: La investigación se realizó con un número limitado de estudiantes, lo que podría afectar la generalización de los resultados.

Duración del estudio: El tiempo de implementación y evaluación fue breve, limitando la observación de los efectos a largo plazo.

Recursos técnicos: La disponibilidad y calidad de los equipos de impresión 3D pueden haber influido en la precisión y efectividad de los modelos.

Variación de módulos: Se utilizaron modelos específicos de la columna vertebral y andamios, sin explorar una gama más amplia de aplicaciones de impresión 3D en Seguridad y Salud en el Trabajo (SST).

CONCLUSIONES

Impacto positivo de la impresión 3D

Los estudiantes mostraron un incremento del 32,81 % en la comprensión de posturas correctas e incorrectas en ergonomía y del 36,39 % en habilidades prácticas relacionadas con el montaje y desmontaje de andamios. La introducción de la tecnología de impresión 3D en la educación de Seguridad y Salud en el Trabajo (SST) mejora notablemente la comprensión y retención de conocimientos, lo que se traduce en una mayor capacidad para aplicar estos conocimientos en situaciones prácticas.

Estos hallazgos destacan el potencial de la impresión 3D para transformar la educación en SST, proporcionando herramientas educativas efectivas que pueden ser adoptadas a mayor escala para mejorar la formación en seguridad y salud ocupacional. La posibilidad de manipular modelos físicos facilita un aprendizaje más interactivo y tangible, promoviendo una participación activa de los estudiantes.

RECOMENDACIONES

Ampliar la muestra y la duración del estudio: Se recomienda aumentar el tamaño de la muestra y extender la duración de los estudios futuros para evaluar el impacto de la impresión 3D a largo plazo. Una muestra más grande y diversificada proporcionará datos más robustos y generalizables.

Explorar diversas aplicaciones de impresión 3D en seguridad y salud en el trabajo (SST): Es fundamental investigar el uso de la impresión 3D en diversos contextos dentro de SST, como el manejo de sustancias peligrosas, primeros auxilios, uso de extintores, y equipos de protección personal. También se sugiere evaluar la efectividad de diferentes tipos de modelos impresos para identificar qué enfoques son más efectivos en la enseñanza de conceptos específicos.

Evaluar el impacto en diferentes contextos educativos: Se recomienda explorar el uso de la impresión 3D en distintos niveles educativos, como la formación técnica, la educación continua y la capacitación laboral, así como en diversos contextos culturales.

Desarrollar programas de capacitación docente en tecnologías 3D: Dado el interés y la percepción positiva de los docentes hacia el uso de la impresión 3D, es esencial implementar programas de formación continua que los capaciten en el uso de esta tecnología y en metodologías de enseñanza innovadoras.

REFERENCIAS

- [1] Berrones, L., Moyano, M., Espinoza, L. & Congacha, E. (2023). La gamificación en el aprendizaje significativo de las asignaturas de educación básica. *Revista Polo del Conocimiento*, 8(7), 240-262. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i7>
- [2] Borroy Tomás, D. (2022). ApS en tres dimensiones: una propuesta didáctica para la integración de la impresión 3D a través de metodologías activas. <https://repositorio.usj.es/handle/123456789/878>
- [3] Cabrera, L. & Córdova, M. (2023). Impresión 3D como herramienta educativa para el desarrollo del pensamiento creativo: revisión sistemática. *Apertura*, 15(2), 88-103. <https://doi.org/10.32870/ap.v15n2.2382>
- [4] Camacho, R., Rivas, C., Gastar, M. & Quiñonez, C. (2020). Innovación y tecnología educativa en el contexto actual latinoamericano. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, 26. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28064146030>
- [5] Candia, F. (2022). Integración de la impresión 3D en la educación tecnológica. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. <https://doi.org/10.23913/ride.v12i24.1170>
- [6] Cheng, L., Antonenko, P., Ritzhaupt, A. & MacFadden, B. (2021). Exploración del papel de la impresión 3D y los niveles de integración STEM en el interés profesional de los estudiantes en STEM. *British Journal of Educational Technology*, 52, 1262-1278. <https://doi.org/10.1111/BJET.13077>

- [7]** De la Cruz-Campos, J., Campos-Soto, M., Rodríguez-Jiménez, C. & Ramos Navas-Parejo, M. (2022). Impresión 3D en educación. Perspectiva teórica y experiencias en el aula. *Revista Centra de Ciencias Sociales*, 1(1), 67-80. <https://doi.org/10.54790/rccs.16>
- [8]** Eslahi, A., Chadeesingh, D., Foreman, C. & Alpay, E. (2020). Impresoras 3D en la educación en ingeniería. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35396-4_7
- [9]** Garcés, G. & Peña, C. (2020). Ajuste de la educación en ingeniería a la Industria 4.0: una visión desde el desarrollo curricular y el laboratorio. *Revista de Estudios y Experiencias en Educación*, 19(40), 129-148. <https://doi.org/10.21703/rexe.20201940garcés7>
- [10]** Johnson, L. & Lewis, M. (2021). Título del estudio sobre impresión 3D en SST. *Occupational Safety Journal*.
- [11]** Karsenty, C. *et al.* (2021). La utilidad de los modelos cardíacos impresos en 3D para la educación de los estudiantes de medicina en cardiopatías congénitas. *BMC Medical Education*, 21. <https://doi.org/10.1186/s12909-021-02917-z>
- [12]** Kermavnar, T., Shannon, A. & O'Sullivan, L. (2021). La aplicación de la fabricación aditiva/impresión 3D en aspectos ergonómicos del diseño de productos: una revisión sistemática. *Applied Ergonomics*, 97, 103528. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103528>
- [13]** Khurma, O., Ali, N. & Khine, M. (2023). Exploración del impacto de la integración de la impresión 3D en las actitudes STEM en las escuelas primarias. *Tecnología Educativa Contemporánea*. <https://doi.org/10.30935/cedtech/13568>
- [14]** Kováčik, P. (2022). Posibilidades de la impresión 3D como tecnología moderna utilizada en la educación. *Revista de Educación, Tecnología y Ciencias de la Computación*. <https://doi.org/10.15584/jetacomps.2022.3.10>
- [15]** Lazareva, N. (2023). Uso de modelos 3D de objetos naturales como segmento componente del proceso educativo digital. *Boletín Educativo "Conciencia"*. <https://doi.org/10.26787/nydha-2686-6846-2023-25-1-11-17>
- [16]** Mata, A. (2023). Propuesta para la incorporación del modelado e impresión 3D para la enseñanza de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. <https://doi.org/10.15517/revedu.v47i1.51675>
- [17]** Nguyen, P. *et al.* (2022). Un enfoque de aprendizaje automático basado en datos para la optimización del proceso de impresión 3D. *Prototipado Virtual y Físico*, 17, 768-786. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2068446>
- [18]** Olatunji, G., Osaghae, O. & Aderinto, N. (2023). Exploración del papel transformador de la impresión 3D en el avance de la educación médica en África: una revisión. *Annals of Medicine and Surgery*, 85, 4913-4919. <https://doi.org/10.1097/MS9.0000000000001195>
- [19]** Sandybayev, A. (2021). Evaluación del efecto de las tecnologías de impresión 3D en la innovación y el emprendimiento: un estudio de caso práctico. *Sumerianz Journal of Business Management and Marketing*. <https://doi.org/10.47752/sjbm.43.105.114>
- [20]** Smith, J. *et al.* (2020). Título del estudio sobre simulaciones virtuales y modelos físicos. *Journal of Educational Technology*.
- [21]** Velkov, P. (2023). Impresión 3D en la educación: enfoques innovadores para el aprendizaje a través de tecnologías 3D modernas. *Educación STEM Innovadora*. <https://doi.org/10.55630/stem.2023.0526>
- [22]** Wibawa, B., Syakdliyah, H., Siregar, J. & Asrorie, D. (2021). Uso de la impresión 3D para el aprendizaje de las ciencias y la tecnología de fabricación. <https://doi.org/10.1063/5.0045380>
- [23]** Yula, Z. & Zhu, X. (2022). Análisis de aplicaciones del entorno de integración de realidad virtual basado en tecnología de realidad virtual en la enseñanza de educación física. *2022 2nd International Conference on Information Technology and Contemporary Sports (TCS)*, 76-81. <https://doi.org/10.1109/TCS56119.2022.9918720>

ACERCA DE LOS AUTORES

Fernando Hugo Humpiri Montoya

N.º de ORCID: 0009-0006-5370-1128

N.º autor Redalyc: 75350

Ingeniero Industrial formado en la UAI. Actualmente, curso la maestría en Docencia Universitaria y Gestión Educativa en la Universidad Tecnológica del Perú (UTP). Certificado como técnico en Emergencias Médicas en Argentina. Cuenta con una especialización en Higiene Laboral por la Universidad ESAN, así como con una especialización en Prevención de Riesgos Laborales por Ceeur de España. Especialista en Ergonomía Laboral por la Universidad Continental y CENEA - España. Instructor del Programa Internacional Stop The Bleed®. Certificación Internacional como Entrenador lúdico en SST por la Asociación Latinoamericana de Seguridad e Higiene en el trabajo (Alaseht). Docente Instructor de Seguridad y Salud en el Trabajo desde 2012 para Empresas de gran minería del sur del Perú. Ha liderado con éxito el desarrollo de cursos y programas de capacitación para empresas mineras. Actualmente, se desempeña como docente de la carrera Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo en Tecsup Arequipa.

 fhumpiri@tecsup.edu.pe

McDonald Villacorta Choque

Egresado de la carrera de Ingeniería Industrial en la Universidad Jesuita Antonio Ruiz de Montoya y técnico en Mantenimiento de Equipo Pesado por el Instituto Superior Tecsup, cuenta con más de cinco años de experiencia en gestión de equipo pesado en minería a cielo abierto. Además, ha liderado la iniciativa nacional RED FESTILAB, cuyo objetivo es democratizar la ciencia en el país.

Fue ganador del Reto Bio del Ministerio de Producción de Perú, obteniendo un fondo semilla no reembolsable en soles con el proyecto OXCEM. Participó como expositor en el Panel Talk With Post Carbon Labs en el «Global Community Bio Summit 3.0» del Massachusetts Institute of Technology (MIT) en 2019, y fue finalista en la Entrepreneurship World Cup, a realizarse en Arabia Saudita en 2020. Actualmente, se desempeña como docente en el área de gestión en Tecsup.

 mvillacorta@tecsup.edu.pe

Recibido: 30-04-24
Revisado: 16-09-24
Aceptado: 27-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Construcción de un modelo de series de tiempo de tipo forecasting autorregresivo recursivo, mediante Python a través de Jupyter Notebook para su procesamiento.



Modelo de series de tiempo para predecir la demanda de atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Time series model to predict the demand for care of patients with chronic kidney disease, 2022

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es pronosticar la demanda de pacientes con enfermedad crónica renal en establecimientos de salud estatales del Perú en 2022 mediante modelos de series de tiempo y realizar un análisis descriptivo de dicha demanda. Este estudio se justifica, ya que no existen estudios de este tipo en Perú, aun sabiendo de las carencias en equipamiento e insumos para el tratamiento de enfermedades renales mediante procedimientos médicos como la diálisis.

Se trata de un estudio de alcance descriptivo y exploratorio; el diseño es no experimental, transversal y descriptivo. La población está conformada por 1 064 744 registros de pacientes con información variada como periodo de atención, código de identificación, nombre del establecimiento de salud, entre otros tomados de la Plataforma de Datos Abiertos del Perú. No se realizó un muestreo debido a que se construyeron modelos de series de tiempo en intervalos diarios. Se usaron técnicas estadísticas como gráficos de barras simples y apilados, gráficos circulares y tablas de frecuencias; se construyó un modelo de series de tiempo de tipo *forecasting* autorregresivo recursivo, mediante Python a través de Jupyter Notebook para su procesamiento.

Los resultados más importantes muestran que la mayor demanda se concentra en Lima, con una distribución equilibrada entre hombres y mujeres, y una mayor incidencia en personas de 50 a 70 años, especialmente entre quienes tienen seguro gratuito. Analizando las componentes de la serie de tiempo y haciendo uso de la prueba de Dicky-Fuller, se optó por emplear un modelo *forecasting* autorregresivo recursivo obteniendo con R^2 de 96,62 %. Además, luego de realizar un ajuste de hiperparámetros, se logró obtener un R^2 de 94,61 % para el mismo modelo, siendo este menos sobre ajustado y cumpliendo con la mayoría de los supuestos de series de tiempo.

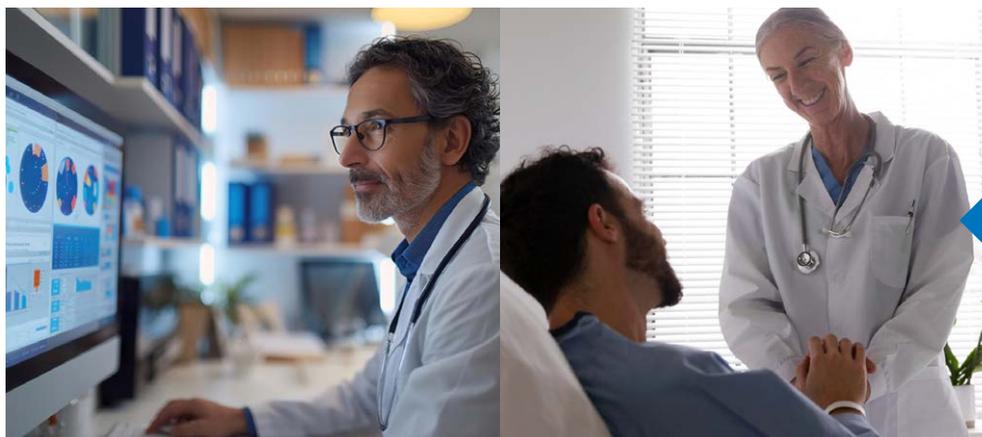
Por tanto, podemos concluir que el modelo obtenido es bueno para predecir la demanda de pacientes demanda de atención de pacientes con enfermedad renal crónica, ya que tiene un desempeño óptimo y cumple con todos los supuestos a excepción de la autocorrelación.

ABSTRACT

The main objective of this study is to forecast the demand for patients with chronic kidney disease in state-run healthcare facilities in Peru in 2022 using time series models, and to conduct a descriptive analysis of this demand. This study is justified as there are no similar studies in Peru, despite the known deficiencies in equipment and supplies for the treatment of kidney diseases through medical procedures such as dialysis.

This is a descriptive and exploratory study; the design is non-experimental, cross-sectional and descriptive. The population consists of 1,064,744 patient records with various information, such as the care period, identification code, name of the healthcare facility, among others, taken from the Open Data Platform of Peru. No sampling was carried out because time series models were built at daily intervals. Statistical techniques such as simple and stacked bar graphs, pie charts and frequency tables were used; A recursive autoregressive forecasting time series model was built using Python through Jupyter Notebook for processing.

The most important results show that the highest demand is concentrated in Lima, with a balanced distribution between men and women, and a higher incidence in people aged 50 to 70, especially among those with free insurance. Analyzing the components of the time series and using the Dicky-Fuller test, it was decided to use a recursive autoregressive forecasting model, obtaining an R^2 of 96.62%. In addition, after performing



Palabras Claves

Demanda de pacientes, enfermedad renal crónica, series de tiempo, forecasting autorregresivo, ajuste de hiperparámetros, supuestos de series de tiempo.

Key words

Patient demand, chronic kidney disease, time series, autoregressive forecasting, hyperparameter tuning, time series assumptions..

a hyperparameter adjustment, an R^2 of 94.61% was obtained for the same model, which was less over-adjusted and met most of the time series assumptions [3].

Therefore, we can conclude that the model obtained is good for predicting the demand for care of patients with chronic kidney disease since it has an optimal performance and meets all the assumptions except for autocorrelation.

INTRODUCCIÓN

La enfermedad renal crónica (ERC) es un problema de salud pública con una alta mortalidad cardiovascular y elevados gastos en salud. Se estima un trillón de dólares en cuidados para pacientes con ERC a nivel mundial [9]. Se calcula que el 50 % de la población de pacientes con ERC no recibe terapia de reemplazo renal (TRR), y en algunas regiones del Perú no existen centros de diálisis del Ministerio de Salud (Minsa) para atenderlos, lo que implica la necesidad de duplicar el presupuesto de salud [9].

De acuerdo con Zanabria-Calderón (2022) [21], la carga de esta enfermedad se ha incrementado con 21 millones de nuevos casos de ERC en 2016 y 1,2 millones de muertes anuales. Además, EsSalud cuenta con estadísticas de demanda atendida de la ERC desde 2010 a 2016 [22].

A pesar de la alta mortalidad de la ERC, la investigación en Perú es limitada. Dado que los principales factores de riesgo varían según la región, se deduciría que la mortalidad no es uniforme en todas las regiones, siendo la sierra la que presenta mayores cifras de esta según el Minsa [6].

En 2002, el portal del Gobierno del Perú afirmó que el 11 % de la población del Perú padecía ERC [14]. En 2024, el portal web Infobae informó que más de 2,5 millones sufren de esta enfermedad según el Minsa [5]. Esto convierte a los riñones en uno de los órganos más demandados para trasplantes.

El objetivo de este trabajo es encontrar la demanda de atención de pacientes con ERC en el Perú en 2022. Para ello, se emplearán modelos de series de tiempo para predecir dicha demanda, eligiendo el mejor. Además, se ejecutará análisis descriptivo con la data de los pacientes del Fondo Intangible Solidario de Salud.

FUNDAMENTOS

Jilani *et al.* [10] buscan desarrollar un modelo para predecir la atención a los servicios de urgencia, a fin de planificar de manera óptima los recursos. Así, concluyen que el modelo de lógica difusa basado en series de tiempo difusas tuvo una precisión aceptable durante un periodo corto de tiempo a comparación de otros modelos de predicción que se utilizan comúnmente. Por otra parte, Darío y Martínez [7] buscan identificar un buen modelo de pronóstico usando técnicas de suavización y realizar la validación de los supuestos de los residuales. Concluyen que existen diversas técnicas para abordar una serie de tiempo y que la selección debe ser la más simple y comprensible posible, apoyada en el uso de *software* adecuado para realizar múltiples ensayos, así como pedir la opinión de expertos en el tema.

En el trabajo «Time series modelling to forecast prehospital EMS demand for diabetic emergencies» [22], los autores tienen como objetivo modelar las tendencias temporales y proporcionar pronósticos de las asistencias prehospitalarias para emergencias diabéticas, utilizando un análisis de series de tiempo del año 2009 al 2015 con el modelo SARIMA (0, 1, 0, 12) fue el que mejor se ajustó, con un MAPE del 4,2 %. Concluyen que la demanda de servicios médicos de urgencia prehospitalarios para emergencias diabéticas está en aumento, lo cual resulta útil para los proveedores al facilitar la planificación y asignación adecuada de recursos para estos servicios. Además, Jin, Ok y Woong [11] desarrollan y evalúan modelos de series temporales para predecir el número diario de pacientes en un hospital coreano, utilizando datos de 2007 a 2008. Establecieron tres modelos de pronóstico, y el modelo SARIMA resultó ser el más adecuado, con un MAPE de 7,4 %. Concluyen que la incorporación de variables explicativas en un modelo SARIMA multivariante mejora la confiabilidad y precisión de los pronósticos.

En la tesis de Parra [15], se plantea como objetivo encontrar un modelo estructural para predecir la demanda de pacientes en un centro de salud de Guayaquil. La conclusión señala que, para la variable consulta general, el modelo 4, basado en nivel, pendiente, tendencia, estacionalidad, ciclo y componente irregular, es el que mejor se ajusta a los datos. En cambio, para la variable odontología, el modelo 3, basado en la componente estacional, es el que presenta un mejor ajuste. Por su parte, en el estudio de Sen y Chaudhuri [17], el objetivo es aplicar un enfoque de descomposición de series temporales para analizar el comportamiento y las propiedades de la serie. Se proponen seis modelos para predecir indicadores en el sector salud, y se concluye que estos alcanzan un nivel de precisión aceptable, incluso ante la presencia de componentes aleatorios y tendencias abruptas.

Rosa-Jiménez, Montijano, Ália y Zambrana [16] analizan la atención primaria y las urgencias tomando en cuenta las características epidemiológicas de los pacientes que acuden a consultas externas en diversas especialidades. Concluyen que existe una mayor demanda sanitaria por parte de las mujeres, aunque esta varía según la edad, el lugar de procedencia y el origen de la solicitud de asistencia.

Por todo lo anterior, este trabajo tiene como propósito pronosticar la demanda de pacientes con enfermedad renal crónica en los establecimientos de salud estatales del Perú para 2022, mediante modelos de series de tiempo, y realizar un análisis descriptivo de dicha demanda en función de características específicas.

La limitación más importante es que solo se encuentran datos sobre atenciones de cobertura de enfermedad renal de 2022 y el primer semestre de 2023; por ese motivo, se propondrán modelos de series de tiempo en intervalos diarios para tener con una mayor cantidad de datos.

METODOLOGÍA

Tipo y diseño de investigación

La investigación que se llevará a cabo es de tipo cuantitativa [8]. Se trata de un estudio de alcance descriptivo, ya que busca especificar las propiedades y características de un fenómeno, y

exploratorio, dado que examina un tema poco estudiado o no abordado previamente [8]. El objetivo es pronosticar la demanda de atención de pacientes con enfermedad renal crónica en 2022 y realizar un análisis descriptivo de dicha demanda.

El diseño es no experimental, dado que «no se manipulan de forma intencional las variables independientes para observar su efecto en otras variables» [8]. Asimismo, es transversal, puesto que los datos se tomaron en un solo momento en el tiempo, y descriptivo, ya que indaga sobre los niveles de una o más variables en la población [8].

Dado que Hernández, Fernández Baptista (2014) [8] es una referencia destacada en el campo de la investigación, se ha optado por seguir su metodología. No obstante, es importante tener en cuenta que existen diversas clasificaciones y métodos de investigación [18].

Población y muestra

La población de estudio está conformada por 1 064 744 registros de atenciones de cobertura de ERC de 2022 y cuyas variables se detallan en la tabla 1.

Tabla 1
Variables, descripción, tipo de dato y tamaño de atenciones de cobertura de enfermedad renal crónica, 2022

Variable	Descripción	Tipo de dato	Tamaño
DOCUMENTO_ANONIMIZADO	Documento del paciente anonimizado	Alfanumérico	10
PERIODO	Periodo de la atención del paciente oncológico	Numérico	6
RENAES	Código de identificación del establecimiento de salud	Texto	10
IPRESS	Nombre del establecimiento de salud donde se realizó la atención oncológica	Texto	80
REGIÓN	Región donde se encuentra ubicada el establecimiento de salud	Texto	30
DEPARTAMENTO	Departamento donde se encuentra ubicado el establecimiento de salud	Texto	15
PROVINCIA	Provincia donde se encuentra ubicado el establecimiento de salud	Texto	100
DISTRITO	Distrito donde se encuentra ubicado el establecimiento de salud	Texto	100
UBIGEO	Código de ubicación geográfica donde se encuentra ubicado el establecimiento de salud	Alfanumérico	6
CÓDIGO_DIAGNÓSTICO	Código CIE-10 (xxxxxx) con el cual se identifica al diagnóstico del paciente	Texto	8
DIAGNÓSTICOS	Descripción del diagnóstico CIE-10	Texto	100
GRUPO_DIAGNÓSTICOS	Grupo de diagnóstico al cual pertenece el CIE-10	Texto	100
GRUPO_COBERTURA	El grupo de las categorías de los grupos de diagnósticos	Texto	100
SEXO	Sexo del paciente oncológico	Texto	10
EDAD	Edad del paciente oncológico	Numérico	3
TIPO_SEGURO	Tipo de seguro de cobertura del FISSAL	Texto	30
SERVICIO	Descripción del código de la prestación o atención	Texto	100
FECHA_ATENCIÓN	Fecha en que se brindó la atención	Numérico	8
MONTO_BRUTO	Monto total de la prestación oncológica	Numérico	24
FECHA_CORTE	Día en el que se generó el dataset	Numérico	8

Fuente: Plataforma de Datos Abiertos, Fondo Intangible Solidario de Salud, 2022.

Debido a que se construirán modelos de series de tiempo en intervalos diarios, no se realizará un muestreo. Esto con el objetivo de tener una mayor cantidad de datos, pudiendo decir que el muestreo llevado a cabo fue no probabilístico por conveniencia que, según [4], «el muestreo probabilístico resulta excesivamente costoso y se acude a métodos no probabilísticos, aun siendo conscientes de que no sirven para realizar generalizaciones, pues no se tiene certeza de que la muestra extraída es representativa».

Técnicas de recolección de datos

Se recurrió a una fuente de datos secundaria y tal como lo define Malhotra [12], «las fuentes de datos secundarios externos publicados incluyen agencias gubernamentales federales, estatales y locales» [12]. Los datos fueron tomados de la página web de la Plataforma de Datos Abiertos¹. Debido a lo anterior, no se requirió de un instrumento de recolección de datos, y la información se recogió en un archivo en formato CSV y

que contiene información sobre atenciones de cobertura de enfermedad renal crónica que van del 2 de enero de 2022 al 31 de diciembre de 2022.

Análisis de los datos

El análisis de la información se realizó mediante gráficos de barras, gráficos de barras apiladas, gráficos circulares y tablas, con el fin de observar las frecuencias en las categorías, tanto para las variables numéricas como no numéricas. Además, estas herramientas se emplearon para mostrar los resultados obtenidos de los modelos de series de tiempo, que analizan datos recopilados en intervalos sucesivos para hacer predicciones. También se incluyeron los valores de los hiperparámetros, que se establecen antes del proceso de aprendizaje de un modelo, y las métricas de desempeño, indicadores cuantitativos que evalúan la eficacia de un modelo de predicción.

El software utilizado para todo el análisis fue Python en su versión 3.11.5, a través de la interfaz web Jupyter Notebook versión 7.0.6, perteneciente a la distribución Anaconda. Las librerías empleadas fueron pandas, para trabajar con *data frames* en

¹ Véase: <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/atenciones-de-cobertura-de-enfermedad-renal-cr%C3%B3nica-2022-fondo-intangible-solidario-de-salud>

forma de tablas; matplotlib, para la creación de visualizaciones; numpy, para el manejo de arreglos multidimensionales (matrices); sklearn, para el preprocesamiento, la creación de modelos de aprendizaje automático y el cálculo de métricas de desempeño; y skforecast, para realizar predicciones a uno o varios pasos en el futuro mediante técnicas de pronóstico.

RESULTADOS

Se realizó un análisis descriptivo de la demanda, con base en las variables más relevantes de la tabla 1.

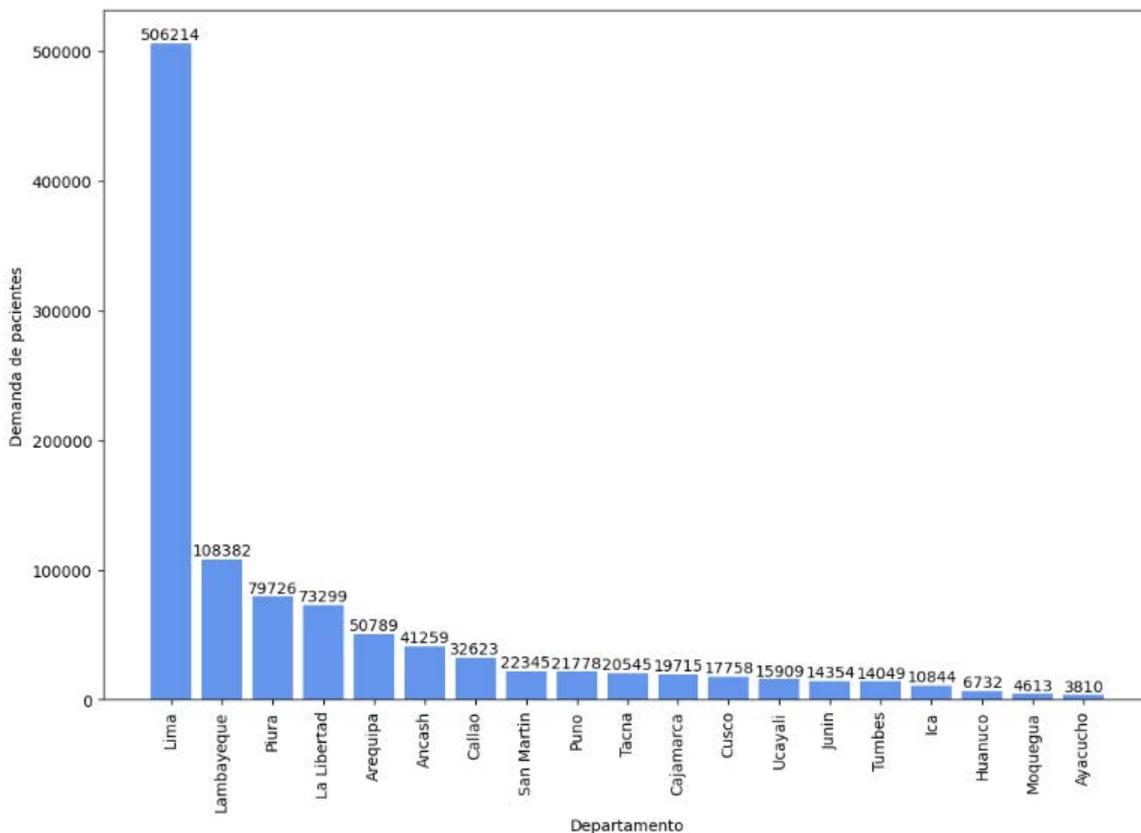


Figura 1. Gráfico de barra de la demanda de pacientes con enfermedad renal crónica por departamento, 2022.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1, podemos observar que Lima cuenta con la mayor demanda, siendo esta de 506 214; mientras que Ayacucho, con

la menor demanda, con un total de 3810.

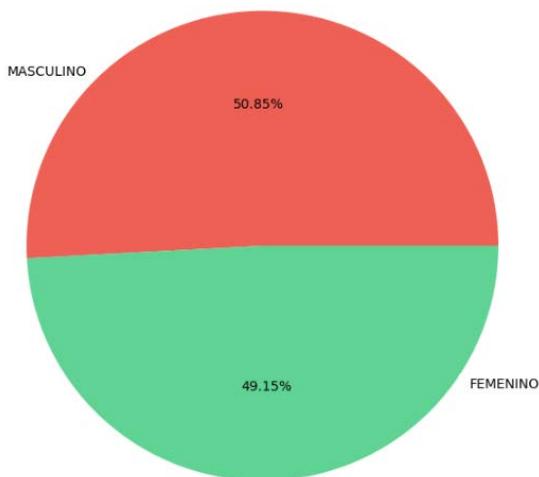


Figura 2. Gráfico circular de la demanda de pacientes con enfermedad renal crónica por sexo, 2022

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la figura 2, vemos que existe un mayor porcentaje de demanda de pacientes con enfermedad renal crónica del sexo

masculino (50,85 %) a diferencia del sexo femenino (49,15%), aunque la diferencia no es mucha.

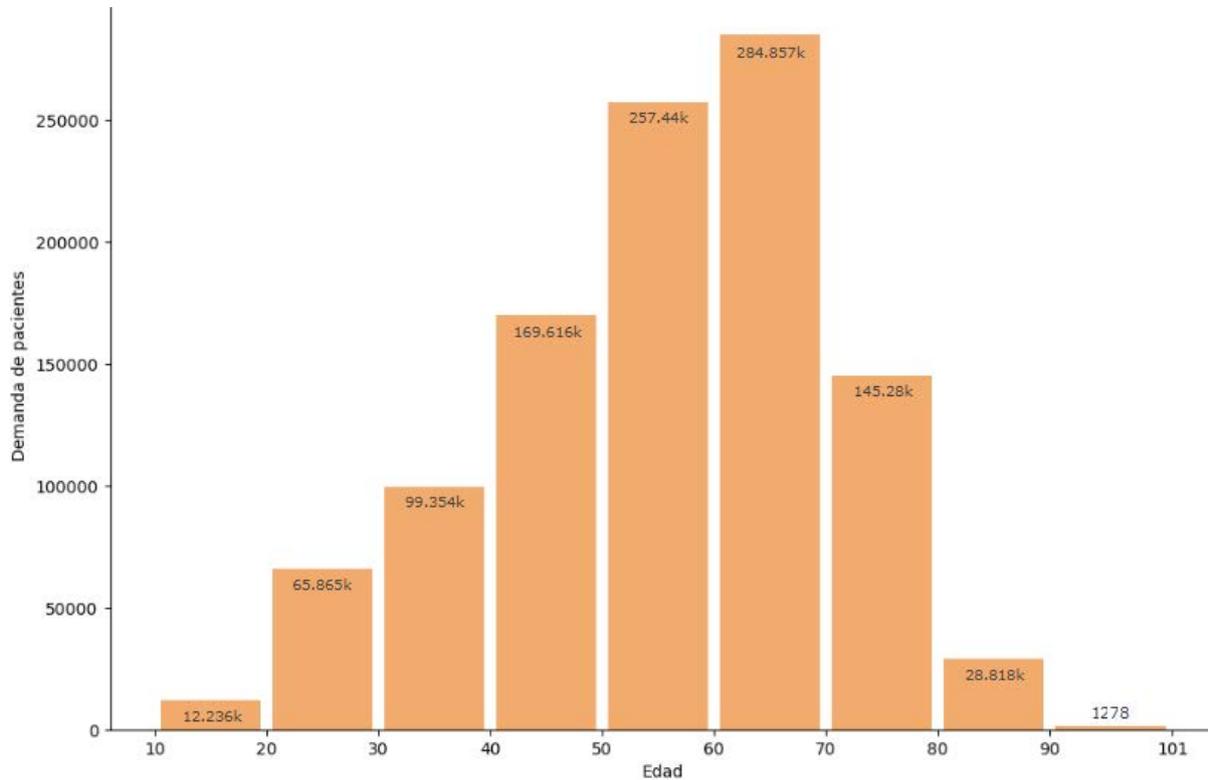


Figura 3. Gráfico de barra de la demanda de pacientes con enfermedad renal crónica por rango de edades, 2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, vemos que la mayor demanda de pacientes con enfermedad renal crónica se encuentra en el rango de edades que va de 50 a 60 años y de 60 a 70 años, sumando un total de

542 297. Por otro lado, la menor demanda se encuentra en el rango de edades de 90 a 101 años, siendo esta de 1278.

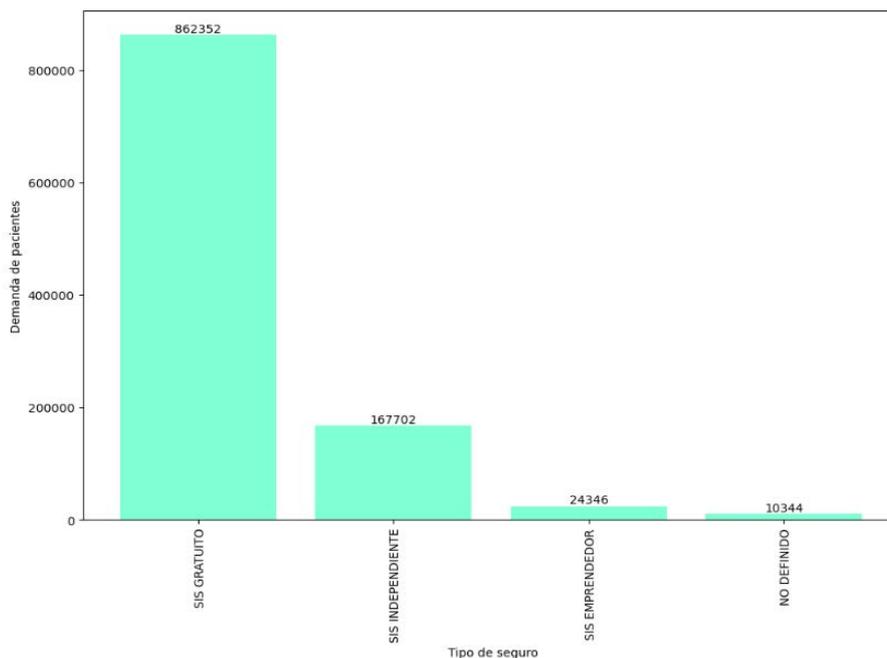


Figura 4. Gráfico de barra de la demanda de pacientes con enfermedad renal crónica por tipo de seguro, 2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4, vemos que en el SIS gratuito se encuentra la mayor demanda de pacientes con enfermedad renal crónica, siendo esta de 862 352 y en el SIS emprendedor se encuentra la menor

demanda representando 167 702. Además, se encontraron 10 344 registros en los cuales no se especifica el tipo de seguro.

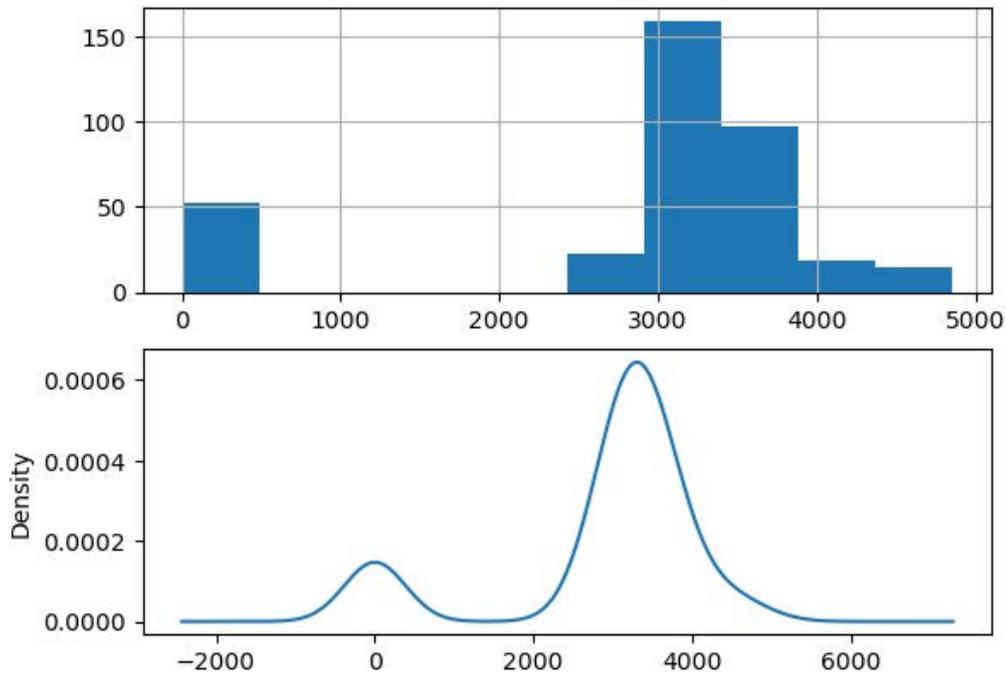


Figura 5. Histograma y gráfico de densidad de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, observamos que, de acuerdo con el histograma y gráfico de densidad, el número de atenciones parece no seguir

una distribución normal, sino, más bien, una distribución mixta normal.

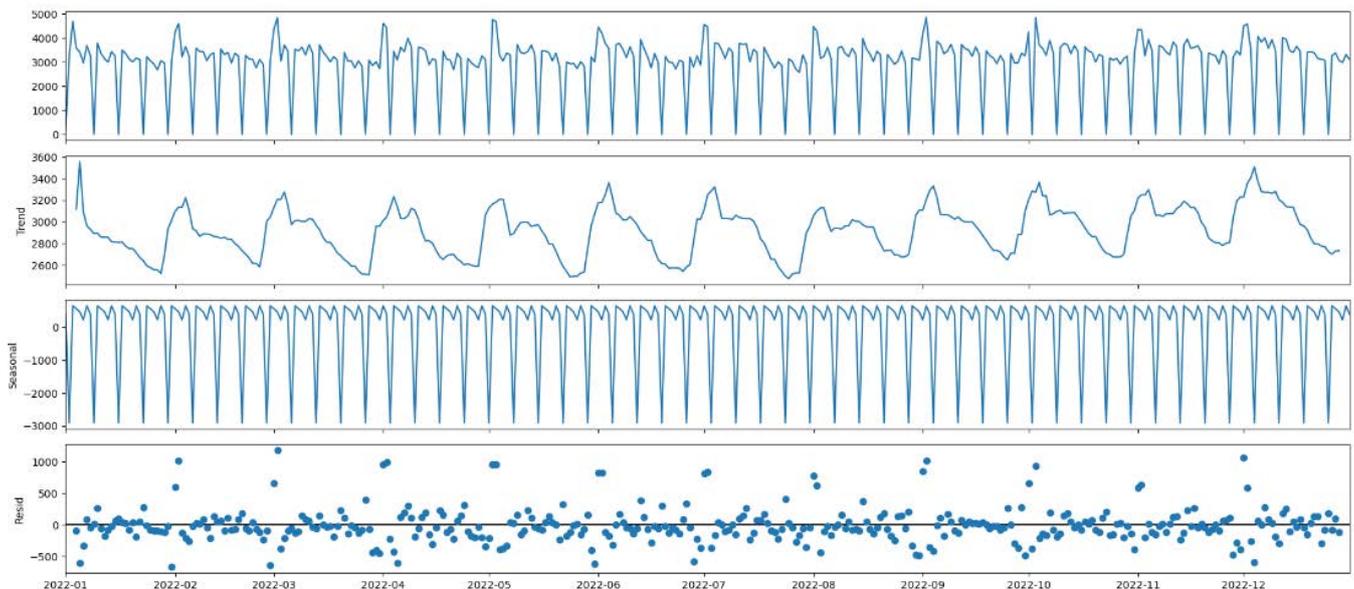


Figura 6. Gráfico de tendencia, estacionalidad y residuales de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la figura 6, se observa una ligera tendencia a crecer, manteniendo una estacionalidad casi constante

y cuyos residuales parecen seguir un comportamiento aleatorio.

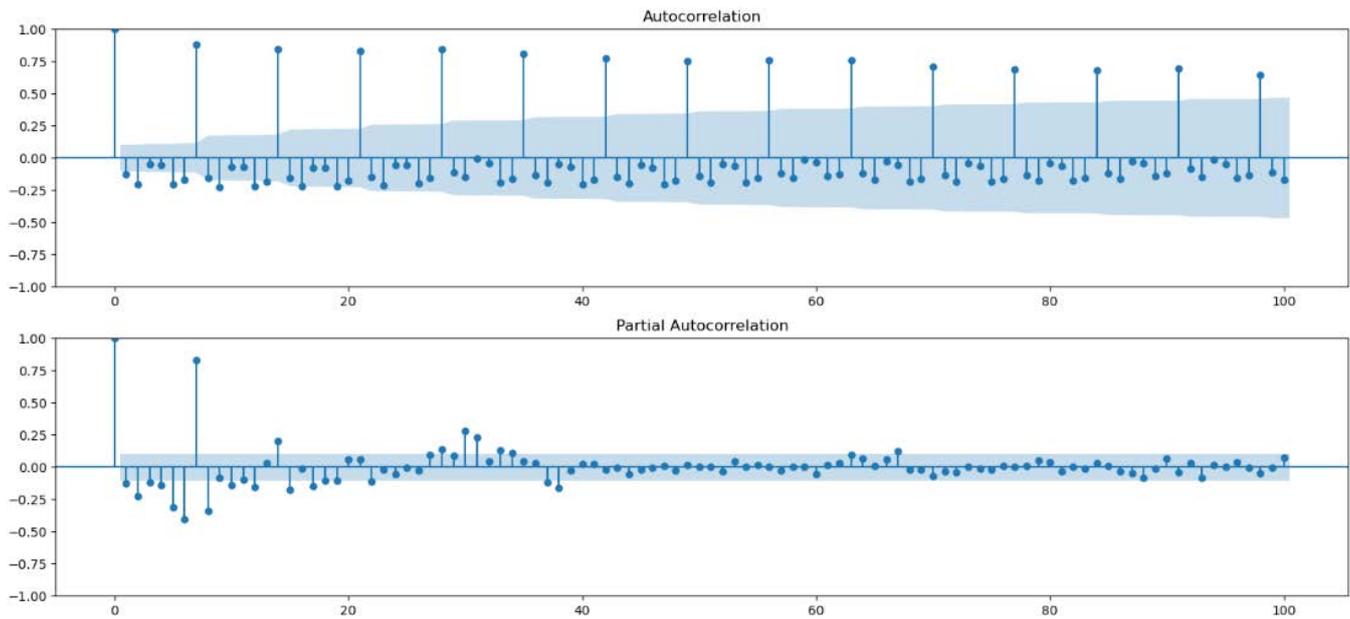


Figura 7. Gráfico de autocorrelación y autocorrelación parcial de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7, vemos que existe correlación con retardos de 7. Esto debido al hecho de que no se llevan a cabo atenciones por enfermedad renal crónica los domingos.

Tabla 2
Resultados de la prueba de Dickey-Fuller

Valor del estadístico	p-valor	Número de lags usados
-6,47	1,37e-08	17

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 2, con un p-valor menor a un nivel de significancia de 0,05, debemos rechazar la hipótesis nula de la prueba de Dickey-Fuller la cual afirma que los datos no son estacionarios. Así, lo recomendable sería proceder sin usar diferencias.

De acuerdo con la figura 8, notamos que existen demandas de atenciones que son iguales a cero, lo cual se debe a que dichas atenciones se realizaron un domingo, donde, generalmente, no se presta ese servicio en los locales de salud.

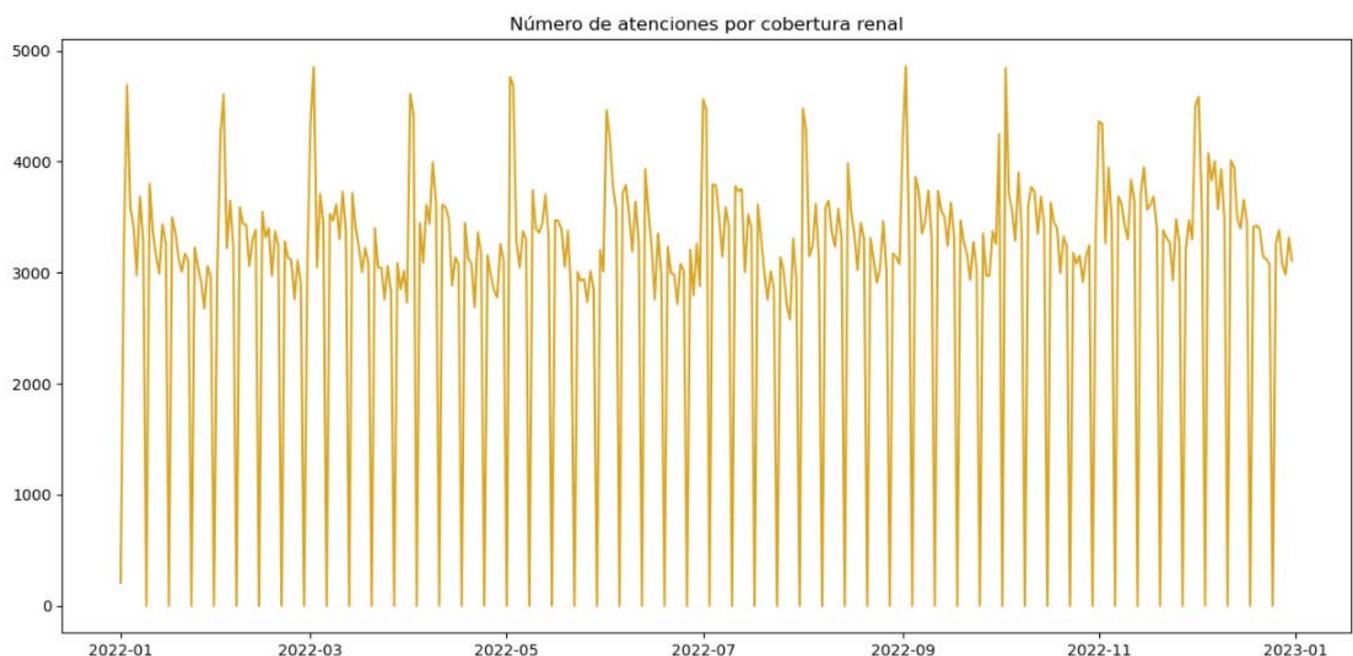


Figura 8. Gráfico de líneas de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Valores atípicos para la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fecha_atención	Número_atenciones
2022-01-01	208
2022-01-02	3256
2022-03-27	1
2022-09-11	1

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 3, en la fecha de atención del 2022-01-01 se tiene una demanda de atención de 208 a pesar de ser feriado y en la fecha de atención del 2022-01-02 se tiene una demanda de 3256 a pesar de ser domingo. Además, notamos que las demandas de atenciones con fechas de atención del 2022-01-27 y 2022-09-11 con valores 1 y 1, respectivamente, son diferentes de cero a pesar de ser domingo, aunque son pequeños a comparación de la mayoría.

Para entrenar nuestro modelo, se tomará los 30 últimos días para los datos de prueba y el resto para el entrenamiento. Se buscará predecir el número de atenciones para estos 30 días, por medio de predicciones *multistep* recursivas, en la cual cada nueva predicción utiliza la predicción anterior [3].

Tabla 4
Valores para los parámetros para el modelo *forecasting* autorregresivo recursivo

Regresor	Número de lags usados	Rango de entrenamiento
Random Forest	7	2022-01-01 al 2022-12-01

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4, podemos observar los valores para los parámetros de nuestro modelo en la cual el regresor es un modelo *Random Forest*, el número de lags será de 7, que es lo que comúnmente se repite cada semana y tomando datos de entrenamiento desde el 1 de enero hasta el 1 de diciembre de 2022.

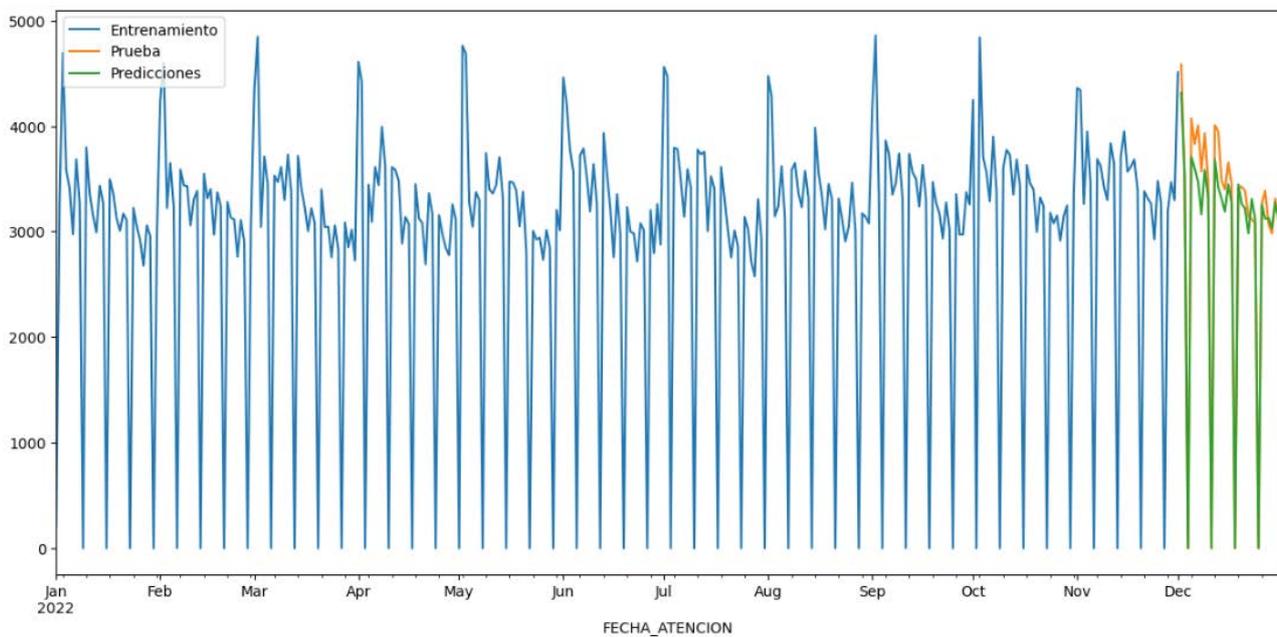


Figura 9. Gráfico de líneas para el entrenamiento, prueba y predicciones de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 9, se evidencia que las predicciones siguen un comportamiento similar a los datos de prueba, lo cual nos da un indicio, de que el modelo entrenado es bueno para predecir el número de atención de pacientes.

Tabla 5
Valores de las métricas de desempeño para el modelo *forecasting* autorregresivo recursivo

Métrica	Valor
Error cuadrático medio	52 728,29
Raíz del error cuadrático medio	229,62
Error absoluto medio	171,36
Coefficiente de determinación	0,9662

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5, observamos los valores de las métricas más importantes para nuestro modelo *forecasting* autorregresivo recursivo de donde podemos ver que posee un coeficiente de determinación de 0,9662, lo cual nos indica que es un buen modelo para predecir.

Tabla 6
Valores de los parámetros y el error cuadrático medio para varios modelos *forecasting* autorregresivo recursivo

Lags	Parámetros		
	Máxima profundidad	Número de estimadores	Error cuadrático medio
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	7	100	149 152,4
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	5	100	149 490,2
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	7	500	149 842,7
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	5	500	149 898,7
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	5	300	151 203,0
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	3	500	153 169,6
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	3	300	153 238,0
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	3	100	153 331,4
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	7	300	154 554,5
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	10	100	154 832,4
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	10	500	159 258,1
[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]	10	300	162 457,3
[1, 2, 3, 4, 5]	5	500	833 534,3
[1, 2, 3, 4, 5]	5	300	1 118 611
[1, 2, 3, 4, 5]	5	100	1 170 591
[1, 2, 3, 4, 5]	7	100	1 366 903
[1, 2, 3, 4, 5]	10	300	1 424 055
[1, 2, 3, 4, 5]	7	500	1 463 126
[1, 2, 3, 4, 5]	10	100	1 467 230
[1, 2, 3, 4, 5]	7	300	1 523 321
[1, 2, 3, 4, 5]	10	500	1 739 128
[1, 2, 3, 4, 5]	3	300	2 091 496
[1, 2, 3, 4, 5]	3	100	2 176 777
[1, 2, 3, 4, 5]	3	500	2 206 203

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la tabla 6, al realizar el ajuste de hiperparámetros, el mejor modelo es el generado mediante 12 lags, con una máxima profundidad de 7 y un número de

estimadores de 100, siendo el error cuadrático medio de 149 152,4.

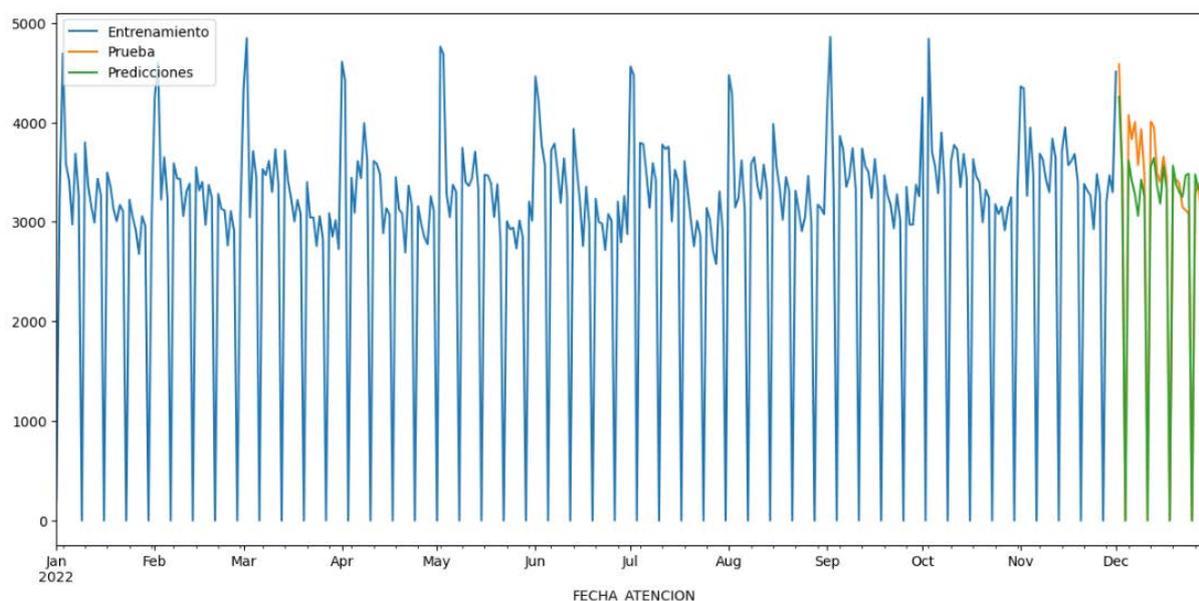


Figura 10. Gráfico de líneas para el entrenamiento, prueba y predicciones con ajuste de hiperparámetros de la demanda por atención de pacientes con enfermedad renal crónica, 2022

Fuente: Elaboración propia.

De la figura 10, se observa que las predicciones con ajuste de hiperparámetros siguen un comportamiento similar a los datos de prueba. Esto nos da un indicio de que el modelo entrenado es bueno para predecir el número de atención de pacientes.

Tabla 7

Valores de las métricas de desempeño para el modelo *forecasting* autorregresivo recursivo con ajuste de hiperparámetros

Métrica	Valor
Error cuadrático medio	84 123,96
Raíz del error cuadrático medio	290,04
Error absoluto medio	224,08
Coefficiente de determinación	0,9461

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, se presentan las métricas más relevantes para nuestro modelo *forecasting* autorregresivo recursivo con ajuste de hiperparámetros. Observamos que el coeficiente de determinación es de 0,9461, lo que indica que el modelo sigue siendo eficaz para realizar predicciones, aunque con menor sobreajuste, lo cual es favorable para la generalización de los resultados.

En la figura 11, observamos que, en el gráfico de valores predichos vs. valores reales, los puntos están distribuidos aproximadamente alrededor de la recta identidad, lo que sugiere que se cumple la suposición de linealidad. Por otro lado, en el gráfico de residuos vs. órdenes, los residuos parecen mostrar un comportamiento aleatorio, lo que indicaría que se cumple el supuesto de independencia. El gráfico de distribución de los residuos propone que estos siguen, aproximadamente, una distribución normal. Sin embargo, en el gráfico de residuos vs. valores predichos, notamos que no todos los puntos se encuentran alrededor de cero, lo que indica que no se cumple la homocedasticidad [19].

Diagnóstico de residuos

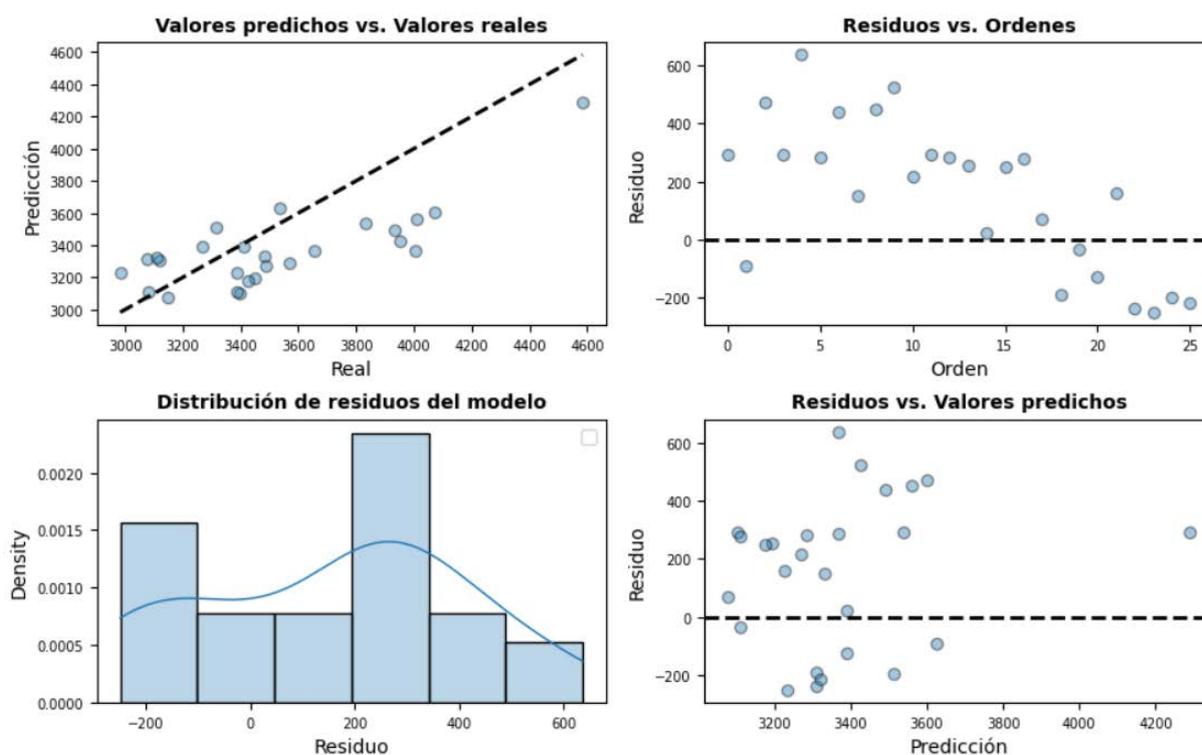


Figura 11. Diagnóstico de residuos para el modelo *forecasting* autorregresivo recursivo con ajuste de hiperparámetros

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Resultados de la prueba de Shapiro-Wilk

Valor del estadístico	p-valor
0,94	0,1399

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla 8, con un p-valor menor a un nivel de significancia de 0,05, debemos aceptar la hipótesis nula de la prueba de Shapiro-Wilk. Esta afirma que los residuos cumplen el supuesto de normalidad [1].

Autocorrelación positiva	Zona de indecisión	Zona de no autocorrelación	Zona de indecisión	Autocorrelación negativa
$0 \leq d_L \leq 2,4 - d_U \leq 4 - d_L \leq 4$				

Figura 11. Rango de valores del estadístico Durbin-Watson para la prueba de no autocorrelación

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 11, vemos el rango de valores del estadístico Durbin-Watson que utilizaremos para la prueba de no autocorrelación. Si buscamos en una tabla de valores críticos del estadístico Durbin-Watson [13], encontramos que, para dos términos que incluyen el intercepto, los valores críticos son $d_L = 1,35$ y $d_U = 1,49$ con un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 9
Resultados de la prueba de Durbin-Watson

Valor del estadístico
0,67

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 9, con un nivel de significancia de 0,05 y con un valor estadístico de $d = 0,67$, que cumple $d < 1,35$, se evidencia que los residuos están autocorrelacionados positivamente, con lo cual no cumplen el supuesto de independencia.

Tabla 10
Resultados de la prueba de Bartlett

Valor del estadístico	p-valor
4,94	0,0263

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la tabla 10, con un p-valor menor a un nivel de significancia de 0,05, debemos rechazar la hipótesis nula de la prueba de Bartlett la cual afirma que los residuos tienen varianza constante. No obstante, si tomamos un nivel de significancia de 0,01, se aceptará la hipótesis nula de la prueba de Bartlett, con lo cual los residuos cumplen el supuesto de homocedasticidad [2].

CONCLUSIONES

Lima es el departamento con mayor demanda a nivel nacional en comparación con los demás. Ayacucho es el que presenta la menor demanda. Además, la demanda entre hombres y mujeres está equilibrada.

Con relación a la demanda por edades, es mayor en adultos mayores y menor en personas que superan los 90 años. En el seguro gratuito se registra la mayor demanda, mientras que en el seguro emprendedor es la menor. También se encontró una categoría con valores nulos, al no estar definido el tipo de seguro.

El análisis de la demanda a través de una serie de tiempo diaria mostró que los datos siguen una distribución normal mixta, con una tendencia ligeramente creciente, estacionalidad casi constante y residuales de comportamiento aleatorio. Los gráficos de correlación y autocorrelación revelaron una correlación con retardos o lags de 7, dado que en la mayoría de los centros de atención no se brinda servicio los domingos.

La prueba de Dickey-Fuller indicó que los datos no son estacionarios, por lo que no es recomendable proceder con diferencias. Se detectaron algunos valores atípicos en cuatro fechas específicas, correspondientes a feriados y domingos, que no fueron omitidos, ya que no presentaban valores muy grandes.

Se entrenó un modelo *forecasting* autorregresivo recursivo con 7 retardos o lags y haciendo uso de un regresor Random Forest,

en donde se observó gráficamente que las predicciones tienen un comportamiento similar a los datos de prueba con un valor de coeficiente de determinación bastante bueno (96,62 %).

Debido a un posible sobreajuste en el modelo, se llevó a cabo un ajuste de hiperparámetros tomando como parámetros, la cantidad de lags, la máxima profundidad y el número de estimadores. En el modelo ganador, las predicciones también tienen un comportamiento similar a los datos de prueba, aunque esta vez con un valor de coeficiente de determinación menor, pero que sigue siendo bueno (94,61 %).

Al realizar un análisis de los supuestos del modelo, se observó de manera gráfica que existe una relación lineal entre los valores reales y predichos; la prueba de Shapiro-Wilk demostró que los residuos siguen una distribución normal; con respecto a la independencia, la prueba de Durbin-Watson dio como resultado que existe cierto nivel de autocorrelación; y en el caso de la homocedasticidad de los residuos, la prueba de Bartlett mostró que esto no se cumple, a menos que se utilice un nivel de significancia mayor.

Se concluye que el modelo propuesto tiene un buen desempeño, a pesar de no cumplir todos los supuestos del modelo *forecasting* autorregresivo recursivo, ya que solo falla en la independencia. Es útil para predecir la demanda de atención de pacientes con ERC en los meses o años posteriores a 2022.

Por último, sobre las limitaciones encontradas en el estudio, no se contó con un mayor rango de años para obtener un modelo más preciso. Se podría optar por realizar futuras investigaciones con respecto a otras demandas de enfermedades crónicas como la diabetes y tipos de cáncer. Además, de acuerdo con lo mencionado por Villani *et al.* [20], este trabajo puede ser útil para que las entidades de salud gubernamentales ejecuten una mejor planificación y asignación de recursos en los servicios médicos hospitalarios.

REFERENCIAS

- [1] Amat, J. (2021a). *Ciencia de datos con Python: Análisis de normalidad con Python*. Ciencia de Datos. <https://cienciadedatos.net/documentos/pystats06-analisis-normalidad-python>
- [2] Amat, J. (2021b). *Ciencia de datos con Python: Análisis de homocedasticidad y heterocedasticidad con Python*. Ciencia de Datos. <https://cienciadedatos.net/documentos/pystats07-test-homocedasticidad-heterocedasticidad-python>
- [3] Amat, J. & Escobar, J. (2023). *Skforecast: Forecasting series temporales con Python y Scikit-learn*. Ciencia de Datos. <https://cienciadedatos.net/documentos/py27-forecasting-series-temporales-python-scikitlearn.html>
- [4] Arias-Gómez, J., Villasís-Keever, M. & Miranda, M. (2016). El protocolo de investigación III: La población de estudio. *Alergia México*, 63(4), 201-206.
- [5] Campó, S. (14 de marzo de 2024). En Perú más de 2,5 millones sufren de enfermedad renal crónica, según el Minsa: ¿Cómo cuidar la salud de los riñones? *Infobae*. <https://www.infobae.com/peru/2024/03/14/en-peru->

mas-de-25-millones-sufren-de-enfermedad-renal-cronica-segun-el-minsa-como-cuidar-la-salud-de-los-rinones/

- [6] Carrillo-Larco, R. & Berbané-Ortiz, A. (2018). Mortalidad por enfermedad renal crónica en el Perú: Tendencias nacionales 2003-2015. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(3), 409-415.
- [7] Darío, L. & Martínez, S. (2007). Una metodología de series de tiempo para el área de la salud: Caso práctico. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 25(2), 117-122.
- [8] Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- [9] Herrera-Añazco, P., Pacheco-Mendoza, J. & Taype-Rondán, A. (2016). La enfermedad renal crónica en el Perú: Una revisión narrativa de los artículos científicos publicados. *Acta Médica Peruana*, 33(2), 130-137.
- [10] Jilani, T. *et al.* (2019). Short and long term predictions of hospital emergency department attendances. *International Journal of Medical Informatics*, 129, 167-174.
- [11] Jin Kam, H., Ok, S. & Woong, P. (2010). Prediction of daily patient numbers for a regional emergency medical center using time series analysis. *Healthcare Informatics Research*, 16(3), 158-165.
- [12] Malhotra, N. (2008). *Investigación de mercados* (5.ª ed.). Pearson Educación.
- [13] Minitab. (2024). Comprobar si existe autocorrelación usando el estadístico de Durbin-Watson. *Soprote de Minitab*. https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/supporting-topics/model-assumptions/test-for-autocorrelation-by-using-the-durbin-watson-statistic/#fntarg_1
- [14] Ministerio de Salud del Perú [Minsa]. (10 de marzo de 2022). Día Mundial del Riñón: El 11 % de la población del Perú padece una enfermedad renal crónica. *Gobierno del Perú*. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/589662-dia-mundial-del-rinon-el-11-de-la-poblacion-del-peru-padece-una-enfermedad-renal-cronica>
- [15] Para, R. (2012). *Un modelo estructural de series de tiempo para la predicción de la demanda de atención médica en el sistema municipal de salud* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Institucional ESPOL.

- [16] Rosa-Jiménez, F., Montijano, A., Ília, C. & Zambrana, J. (2005). ¿Solicitan las mujeres más consultas al área médica? *Anales de Medicina Interna*, 22(11), 515-519.
- [17] Sen, J. & Chaudhuri, T. (2017). A time series analysis-based forecasting framework for the Indian healthcare sector. *Journal of Insurance and Financial Management*, 2(2), 15-34.
- [18] Tam, J., Vega, G. & Oliveros, R. (2008). Tipos, métodos y estrategias de investigación científica. *Pensamiento y Acción*, 14(1), 145-154.
- [19] Vásquez, S., Benavides, T. & Ruiz, S. (2023). *Informe series de tiempo*. RPubs. <https://rpubs.com/sararuz/seriesdetiempo>
- [20] Villani, M. *et al.* (2017). Time series modelling to forecast emergency department presentations. *BMC Health Services Research*, 17(1), 1-9.
- [21] Zanabria-Calderón, J. (2022). Brecha oferta/demanda de prestaciones en el control de la enfermedad renal crónica en EsSalud. *Cátedra Villarreal*, 10(2), 86-97.

ACERCA DEL AUTOR

José Luis Espinoza Melgarejo

Magíster en Docencia Universitaria e Investigación Pedagógica de la Universidad San Pedro de Chimbote (USP), Perú, y licenciado en Matemática de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Perú. Docente de educación superior con más de 10 años de experiencia laborando en instituciones como IDAT, Tecsup, la Universidad Privada del Norte (UPN), la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) y la Universidad Tecnológica del Perú (UTP). Ha dictado diversos cursos en ciencia de datos, matemática, estadística, finanzas entre otros. Especialista en estadística y ciencia de datos que cuenta con estudios de posgrado en la UNMSM y, actualmente, es estudiante de doctorado en Estadística Matemática de la Universidad Nacional del Santa (UNS), Perú.

@ jespinozame@tecsup.edu.pe

@ josespijoin@yahoo.com

Recibido: 21-04-24

Revisado: 22-07-24

Aceptado: 07-08-24

Tecsup®



Conoce nuestras
CARRERAS TECNOLÓGICAS

Departamento de
**MECÁNICA
Y AVIACIÓN**

Departamento de
**DISEÑO Y
PRODUCCIÓN
INDUSTRIAL**

Departamento de
**ELECTRICIDAD
Y ELECTRÓNICA**

Departamento de
**TECNOLOGÍA
DIGITAL**

Departamento de
**MINERÍA Y
PROCESOS
QUÍMICO -
METALÚRGICOS**



Mecatrónica
y Gestión
Automotriz

CARRERA NUEVA



Marketing
Digital
Analítica

CARRERA NUEVA

↳ NUESTROS BENEFICIOS



+100
LABORATORIOS
ALTAMENTE EQUIPADOS



CRÉDITO
EDUCATIVO



RESPALDO DE
ACREDITACIONES
INTERNACIONALES

TECSUP - SEDE CENTRO
Av. Cascanueces 2221
Santa Anita,
Lima 15011, Perú



INSCRÍBETE AQUÍ >

943 977 936

Esponjamiento y su predicción
**basada en la granulometría
de los materiales
fragmentados.**



Exploración de la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de las rocas

Exploration of the Relationship Between Fragmentation Degree and Rock Swelling

RESUMEN

El presente estudio investiga la relación entre la fragmentación de la roca y el esponjamiento, un fenómeno crítico en la minería y la construcción que afecta la eficiencia y los costos de las operaciones. Se evaluaron dos tipos de roca local (arenisca y diorita) mediante pruebas de fragmentación controladas en laboratorio. Las muestras fragmentadas fueron clasificadas granulométricamente y se calcularon sus densidades aparentes. Los resultados indican que el esponjamiento no varía significativamente con fragmentos gruesos, pero se incrementa en fragmentos finos, alcanzando un pico en granulometrías muy pequeñas antes de disminuir notablemente. Además, se observó que la forma y la distribución de los fragmentos influyen en el esponjamiento. Este estudio contribuye al entendimiento del esponjamiento y su predicción basada en la granulometría de los materiales fragmentados.

ABSTRACT

This study investigates the relationship between rock fragmentation and swell, a critical phenomenon in mining and construction that impacts efficiency and operational costs. Two types of local rock (sandstone and diorite) were evaluated through controlled fragmentation tests in the laboratory. The fragmented samples were granulometrically classified, and their bulk densities calculated. Results indicate that swell does not vary significantly with coarse fragments but increases with finer fragments, peaking at very fine granulometries before decreasing notably. Additionally, the shape and distribution of fragments influence swell. This study contributes to the understanding of swell and its prediction based on the granulometry of fragmented materials.



Palabras Claves

Fragmentación de roca, esponjamiento, granulometría, densidad aparente, mecánica de rocas, voladura y movimiento de tierras.

Key words

Rock fragmentation, swell, granulometry, bulk density, rock mechanics, blasting, earthworks / excavation.

INTRODUCCIÓN

En minería y construcción, la fragmentación de la roca es un proceso clave que impacta la eficiencia y los costos operativos. Además, la fragmentación influye directamente en el esponjamiento de la roca, que se refiere al aumento de volumen del material tras ser triturado. Este fenómeno es crucial para el diseño de voladuras y la planificación de proyectos de movimiento de tierra, ya que afecta la capacidad de transporte y almacenamiento del material.

A pesar de la importancia del esponjamiento, la relación cuantitativa entre la fragmentación de la roca y el aumento de volumen no está completamente comprendida. Esta investigación se enfoca en determinar cómo varía el esponjamiento con distintos tamaños de fragmentos y en qué medida es posible predecirlo a partir de la granulometría del material fragmentado.

Objetivos del estudio:

- Evaluar la relación entre el tamaño de los fragmentos de roca y el esponjamiento.
- Evaluar el esponjamiento en rocas arenisca y diorita.

Tamaño de fragmento (m)	Pasante %
x	P
0	0.00%
0.05	0.47%
0.1	2.30%
0.15	5.78%
0.2	10.96%
0.25	17.69%
0.3	25.70%
0.35	34.60%
0.4	43.94%
0.45	53.26%
0.5	62.13%
0.55	70.21%
0.6	77.28%
0.65	83.20%
0.7	87.98%
0.75	91.67%
0.8	94.42%
0.85	96.39%
0.9	97.75%
0.95	98.64%
1	99.21%

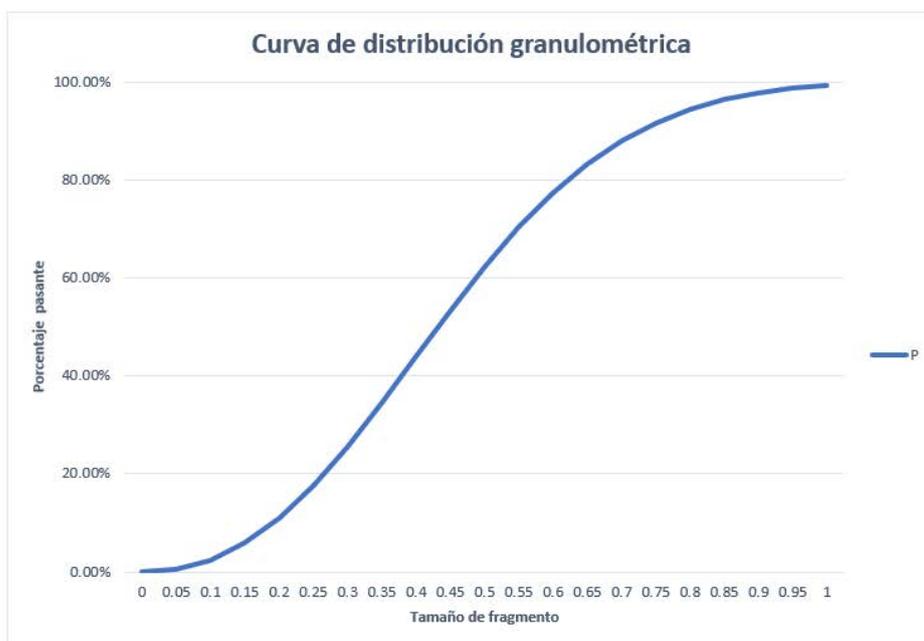


Figura 1. Curva de distribución granulométrica

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al esponjamiento Tiktin [5] escribe en su libro lo siguiente (pp. 19-21):

Los terrenos, tanto de suelo como de roca, están compuestos por una mezcla de partículas de diferentes tamaños. Entre estas partículas existen espacios vacíos que son llenados por aire y agua. Al aplicar una fuerza mecánica y reordenar las partículas, el volumen de estos espacios vacíos cambia. Por lo tanto, el volumen de una muestra de material no es constante, sino que depende de las acciones mecánicas a las que se someta. El volumen que

FUNDAMENTOS

La fragmentación se refiere al proceso de romper el macizo rocoso in situ en fragmentos más pequeños durante las operaciones de excavación o manipulación de materiales. Según Nanda y Naik [4], la distribución del tamaño de los fragmentos y el grado de fragmentación dentro de la masa de roca volada o fragmentada son aspectos cruciales para optimizar la eficiencia en las operaciones de carga, transporte, trituración y molienda.

La fragmentación de la roca en minería e industria se realiza principalmente mediante procesos mecánicos, perforación y voladura. Su predicción y control son esenciales para optimizar las operaciones. Faramarzi, Farsangi y Mansouri [2] señalan que la fragmentación de rocas ha sido el foco de múltiples investigaciones, ya que se considera el aspecto más importante de la producción, afectando los costos de perforación, voladura y la eficiencia de todos los subsistemas, como la carga, el transporte y otras operaciones mineras.

Sanchidrián (citado por Munene *et al.* [3]) señala que los procesos de fragmentación mencionados no generan fragmentos de tamaño homogéneo o uniforme, sino una distribución de fragmentos de diferentes tamaños (ver figura 1).

ocupa en una situación particular se denomina volumen aparente.

Por este motivo, también se habla de densidad aparente, que es la relación entre la masa de una porción de terreno y su volumen aparente.

$$d_a = \frac{M}{V_a}$$

Donde:

d_a : densidad aparente

V_a : volumen aparente

M : masa de las partículas más masa de agua

Al remover el material, se genera un aumento de volumen que debe considerarse al calcular la producción y dimensionar adecuadamente los medios de transporte necesarios. Según lo expuesto, el factor de esponjamiento (*Swell Factor*) se define como la relación entre el volumen del material antes y después de la excavación.

$$F_W = \frac{V_B}{V_S} = \frac{d_S}{d_B}$$

Donde:

F_W : factor de esponjamiento (*swell*)

V_B : volumen que ocupa el material en banco o *in situ*

V_S : volumen que ocupa el material suelto

d_B : densidad en banco o *in situ*

d_S : densidad del material suelto

Otra relación relevante es el porcentaje de esponjamiento, que se refiere al incremento de volumen que experimenta el material en comparación con el que tenía en el banco o *in situ*, es decir, la proporción del aumento en el volumen tras la excavación o manipulación del material:

$$S_W = \frac{V_S - V_B}{V_B} \times 100$$

Donde:

S_W : % de esponjamiento

O en función de las densidades:

$$S_W = \frac{d_B - d_S}{d_S} \times 100$$

En un estudio, Choudhary [1] menciona que el porcentaje de esponjamiento depende del grado de fragmentación. A medida que el grado de fragmentación aumenta, el porcentaje de esponjamiento también incrementa, aunque está limitado por un valor máximo determinado por las características del mineral.

Según lo expuesto, esta investigación tiene como objetivo establecer la relación entre el esponjamiento y el grado de fragmentación, partiendo de la premisa de que, a mayor grado de fragmentación, mayor será el esponjamiento. El proyecto se llevará a cabo con dos tipos de rocas locales, en un laboratorio metalúrgico, utilizando fragmentación controlada y pequeñas cantidades de material de roca. No obstante, es importante considerar las limitaciones del estudio, tales como las siguientes:

- Se utilizaron principalmente dos tipos de roca locales: arenisca y diorita.
- Los ensayos se realizaron con muestras húmedas, lo que influye en la densidad aparente de las rocas. Es importante considerar que la humedad varía en cada muestra debido a la porosidad de las rocas.
- Los resultados obtenidos son representativos únicamente de los tipos de roca estudiados y no pueden extrapolarse a otros tipos de roca.

METODOLOGÍA

El proyecto consideró dos tipos de roca locales (arenisca y diorita), las cuales fueron ensayadas previamente, utilizando como dato inicial las densidades de las muestras sin fragmentar. Para determinar la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento, las muestras fueron fragmentadas con un chancador primario (chancador de quijada), obteniendo fragmentos menores a 1/2" (ver figura 2). Posteriormente, el material chancado pasó por un proceso de clasificación granulométrica utilizando un tamizador Tyler (ver figura 3) con mallas gruesas y finas, para obtener una gama amplia de fragmentos (ver figuras 4 y 5).



Figura 2. Chancador primario de quijadas

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3. Tamizador Tyler

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Set de mallas para clasificación de granulometrías gruesas

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Set de mallas para clasificación de granulometrías finas

Fuente: Elaboración propia.

Después de la clasificación granulométrica, se calculó la densidad de cada granulometría mediante el método de la probeta. Se pesó cada muestra y se midió su volumen en una probeta tres veces, promediando los resultados para obtener la densidad aparente (ver figura 6). Dado que se trabajó con pequeñas cantidades de material, las densidades de las granulometrías gruesas se calcularon con muestras de aproximadamente 600 g, mientras que para las granulometrías finas se utilizaron muestras de 150 g por granulometría.



Figura 6. Herramientas de medición

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis estadístico se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para conocer el nivel de relación entre las variables: grado de fragmentación y esponjamiento de la roca.

Como proceso adicional, se graficaron las curvas granulométricas de las muestras de roca, añadiendo una tercera muestra de granodiorita para ampliar la comparación. Esto permitió comparar las densidades aparentes de los tres tipos de roca (arenisca, diorita y granodiorita) en función de su distribución granulométrica después del chancado.

RESULTADOS

Como primer resultado, se observa que la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento en granulometrías gruesas no es muy significativa (ver tablas 1 y 2). Sin embargo, se aprecia un ligero aumento del esponjamiento en granulometrías finas en comparación con las gruesas. No obstante, en la fragmentación más fina, con una granulometría menor a la malla n.º 50, se destaca una notable reducción del esponjamiento (ver figuras 7 y 8).

Tabla 1
Esponjamiento según malla (tamaño de fragmentos) de la muestra de roca arenisca

ARENISCA			
	Malla	mm	Esponjamiento %
GRUESO	5/8"	16	94,5
	1/2"	12,5	93,9
	3/8"	9,5	96,7
	5/16"	8	95,2
	1/4"	6,3	94,8
	n.º 4	4,75	95,6
FINO	n.º 6	3,35	98,5
	n.º 8	2,36	102,7
	n.º 10	2	99,6
	n.º 14	1,4	101,9
	n.º 20	0,85	101,9
	n.º 30	0,6	102,2
	n.º 50	0,3	96,8
	-n.º 50	-0,3	81,6

Fuente: Elaboración propia.

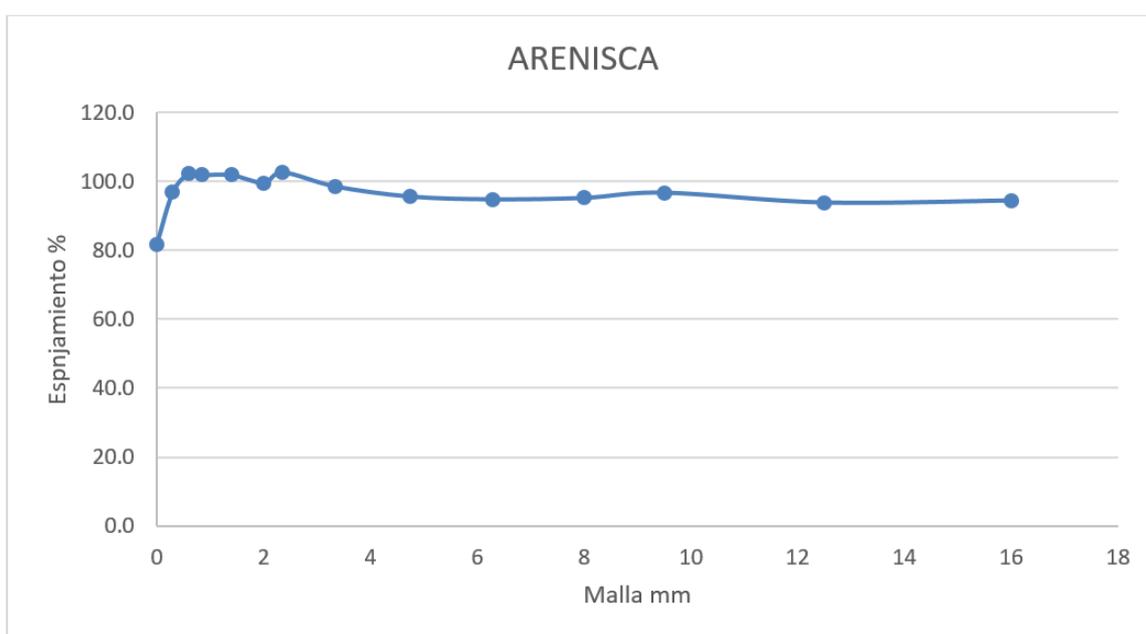


Figura 7. Relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca arenisca

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Esponjamiento según malla (tamaño de fragmentos) de la muestra de roca diorita

DIORITA			
	Malla	mm	Espojamiento %
GRUESO	5/8"	16	92,4
	1/2"	12,5	94,0
	3/8"	9,5	96,6
	5/16"	8	89,3
	1/4"	6,3	90,8
	n.º 4	4,75	94,6
FINO	n.º 6	3,35	93,8
	n.º 8	2,36	101,1
	n.º 10	2	103,6
	n.º 14	1,4	108,8
	n.º 20	0,85	102,6
	n.º 30	0,6	101,1
	n.º 50	0,3	102,1
	-n.º 50	-0,3	82,0

Fuente: Elaboración propia.

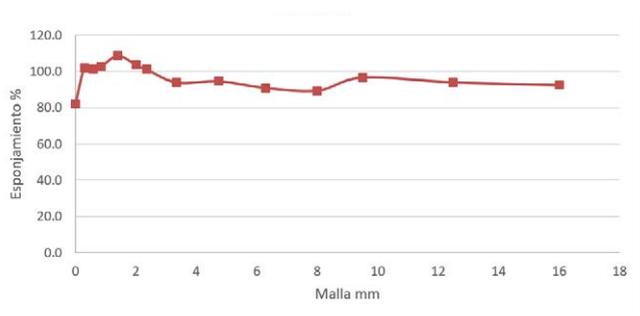


Figura 8. Relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca diorita

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Correlación entre grado de fragmentación y esponjamiento en las rocas diorita y arenisca

DIORITA		ARENISCA	
Malla (mm)	Espojamiento %	Malla (mm)	Espojamiento %
16,0	92,4	16,0	94,5
12,5	94,0	12,5	93,9
9,5	96,6	9,5	96,7
8,0	89,3	8,0	95,2
6,3	90,8	6,3	94,8
4,8	94,6	4,8	95,6
3,4	93,8	3,4	98,5
2,4	101,1	2,4	102,7
2,0	103,6	2,0	99,6
1,4	108,8	1,4	101,9
0,9	102,6	0,9	101,9
0,6	101,1	0,6	102,2
0,3	102,1	0,3	96,8
Menor a 0,3	82,0	Menor a 0,3	81,6
Coef. Pearson (r)	-0,3600	Coef. Pearson (r)	-0,1964
Determinación (r^2)	0,1296	Determinación (r^2)	0,0386

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar ambos tipos de roca, se observa que la relación entre esponjamiento y grado de fragmentación no presenta diferencias relevantes. El esponjamiento promedio es de 96,9 % para la arenisca y 96,6 % para la diorita (ver figura 9).

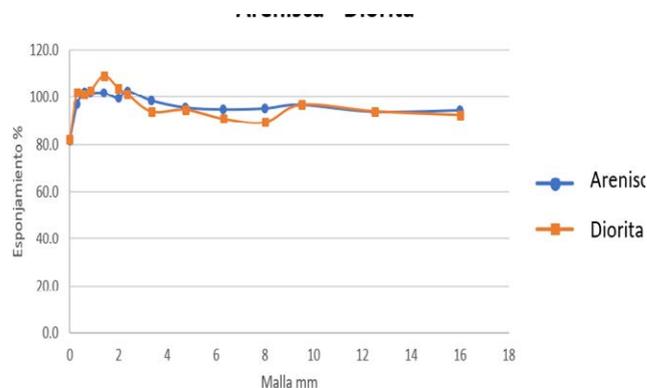


Figura 9. Comparación entre la relación grado de fragmentación-esponjamiento de la arenisca y diorita

Fuente: Elaboración propia.

El análisis con el coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de -0,3600 para la diorita y -0,1964 para la arenisca, lo que indica una relación inversa entre las variables, es decir, a menor número de malla (mayor fragmentación), mayor es el esponjamiento. Sin embargo, al considerar el coeficiente de determinación, los valores obtenidos son 0,1296 para la diorita y 0,0386 para la arenisca, lo que sugiere que, aunque las variables no son completamente independientes, la relación entre ellas es débil (ver tabla 3).

Si omitimos en el análisis el efecto observado en la malla menor a 0,3 mm, donde se produce una disminución notable del esponjamiento, los coeficientes de correlación resultan en -0,6880 para la diorita y -0,7587 para la arenisca. Además,

el coeficiente de determinación aumenta significativamente, alcanzando 0,4733 para la diorita y 0,5756 para la arenisca. Esto evidencia un aumento importante en la relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento (ver tabla 4).

Tabla 4
Correlación entre grado de fragmentación y esponjamiento en las rocas diorita y arenisca, en mallas mayores a 0,3 mm

DIORITA		ARENISCA	
Malla (mm)	Esponjamiento	Malla (mm)	Esponjamiento
16,0	92,4	16,0	94,5
12,5	94,0	12,5	93,9
9,5	96,6	9,5	96,7
8,0	89,3	8,0	95,2
6,3	90,8	6,3	94,8
4,8	94,6	4,8	95,6
3,4	93,8	3,4	98,5
2,4	101,1	2,4	102,7
2,0	103,6	2,0	99,6
1,4	108,8	1,4	101,9
0,9	102,6	0,9	101,9
0,6	101,1	0,6	102,2
0,3	102,1	0,3	96,8
0,0	82,0	0,0	81,6
Coef. Pearson (r)	-0,6880	Coef. Pearson (r)	-0,7587
Determinación (r²)	0,4733	Determinación (r²)	0,5756

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados del esponjamiento del material sin considerar la clasificación granulométrica, se observa un mayor esponjamiento en la granodiorita. Por otro lado, la diferencia de esponjamiento entre la arenisca y la diorita es mínima (ver tabla 5).

Tabla 5
Esponjamiento de la arenisca, diorita y granodiorita, sin clasificación geomecánica

	Densidad inicial (sin fragmentar)	Densidad aparente	Esponjamiento
Arenisca	2,06	1,29	59,4
Diorita	2,32	1,48	56,6
Granodiorita	2,47	1,41	75,3

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar las curvas de distribución granulométrica, no se evidenció una diferencia significativa entre las muestras estudiadas. Con estos resultados, se puede asumir que existen otros factores, además de los analizados, que influyen en el esponjamiento (ver figura 10).

Durante el estudio se pudo observar otros factores que tienen relación con el esponjamiento como los siguientes:

- La distribución de los fragmentos dentro del recipiente influye en el volumen, ya que este varía según cómo se acomoden los fragmentos al vaciar el material fragmentado en la probeta.
- La distribución granulométrica afecta al esponjamiento, puesto que una mayor cantidad de finos puede llenar los espacios vacíos entre los fragmentos más gruesos, influyendo en el esponjamiento del material.
- La forma de los fragmentos también es un factor a considerar, ya que se observó que las muestras de roca fragmentada presentaron formas particulares según el tipo de roca.

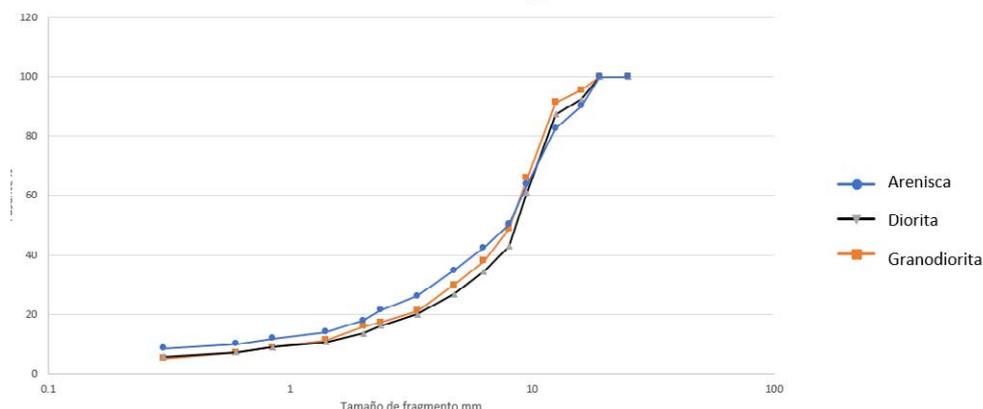


Figura 10. Comparación de las curvas de distribución granulométrica de las muestras de arenisca, diorita y granodiorita

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- El estudio confirma que existe una relación entre el grado de fragmentación y el esponjamiento de la roca. Aunque esta relación varía según el tamaño de los fragmentos, se observó que en fragmentos gruesos el esponjamiento es relativamente constante, mientras que en fragmentos finos aumenta hasta un punto crítico en granulometrías muy pequeñas (menores a 0,3 mm), donde el esponjamiento disminuye significativamente. Este comportamiento sugiere que la densidad aparente de los fragmentos y su distribución juegan roles cruciales en el esponjamiento.
- Se identificó que la acomodación de los fragmentos en el recipiente de medición influye en los resultados del esponjamiento, con diferentes volúmenes aparentes medidos para una misma muestra de roca y granulometría.
- El análisis de correlación de Pearson muestra una relación inversa entre la malla (grado de fragmentación) y el esponjamiento para la diorita y la arenisca. Inicialmente, esta relación es débil, con coeficientes de $-0,3600$ y $-0,1964$ respectivamente. Sin embargo, al excluir las mallas menores a 0,3 mm, donde se observa una disminución notable del esponjamiento, los coeficientes de correlación aumentan a $-0,6880$ para la diorita y $-0,7587$ para la arenisca, con un mayor grado de determinación ($0,4733$ y $0,5756$). Esto propone una relación más fuerte entre el grado de fragmentación y el esponjamiento en mallas mayores a 0,3 mm.
- Al comparar arenisca, diorita y granodiorita, se observó que las curvas granulométricas son similares entre las muestras, aunque la granodiorita presenta un mayor esponjamiento en comparación con la arenisca y la diorita, lo que indica que las características específicas del material influyen en el esponjamiento.
- Finalmente, se concluye que, aunque las diferencias entre arenisca y diorita no son significativas, hay otros factores no estudiados que podrían afectar el esponjamiento, como la distribución granulométrica y la forma de los fragmentos, lo que sugiere la necesidad de futuras investigaciones en esta área.

REFERENCIAS

- [1] Choudhary, B. (2019). Effect of blast-induced rock fragmentation and muckpile angle on excavator performance in surface mines. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 119-126. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.119>
- [2] Faramarzi, F., Farsangi, E. & Mansouri, H. (2013). A rock engineering systems-based model to predict rock fragmentation by blasting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 60, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.ijmms.2012.12.010>
- [3] Munene, E. et al. (2022). A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*, 186, 107743. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107743>
- [4] Nanda, S. & Naik, H. (2023). A review of the blast fragmentation analysis techniques used in surface mines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 71, 2445-2454. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/28601>
- [5] Tikin, J. (1997). *Movimiento de tierras* (3.ª ed.), E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

ACERCA DEL AUTOR

Carlos Yungo Suero

Es ingeniero de minas, se desempeña como docente a tiempo completo en la Tecsup n.º 2, Arequipa. Con amplia experiencia en el sector minero, su enfoque profesional está orientado a la formación de futuros ingenieros, combinando sus conocimientos técnicos con una sólida práctica educativa.

@ cyungo@tecsup.edu.pe

Ruben T. Coaguila Coaguila

Es ingeniero metalúrgico, se desempeña como docente a tiempo completo en la Tecsup n.º 2, Arequipa. Con amplia experiencia en el sector minero metalúrgico (capacitador de operadores en plantas concentradoras). Su enfoque profesional está orientado a la formación de futuros técnicos en operaciones de plantas concentradoras, combinando sus conocimientos técnicos con una sólida práctica educativa.

@ rcoaguila@tecsup.edu.pe

Walter Bedregal Moreano

Es ingeniero geólogo, se desempeña como docente a tiempo completo en Tecsup n.º 2, Arequipa. Con experiencia en geotecnia minera, su enfoque profesional está orientado a la formación de técnicos en operaciones mineras, combinando sus conocimientos en el rubro minero.

@ wbedregal@tecsup.edu.pe

Edwin Daniel Santos Llerena

Ingeniero de minas, actual docente a tiempo completo en Tecsup n.º 2, Arequipa. Combina su vasta experiencia en el sector minero con un enfoque pedagógico sólido, orientado a preparar a los próximos profesionales en el sector minero. Su compromiso con la educación se refleja en una enseñanza que integra conocimientos técnicos y práctica educativa, brindando a sus estudiantes una formación sólida en conocimientos.

@ esantos@tecsup.edu.pe

Recibido: 24-04-24

Revisado: 17-09-24

Aceptado: 03-10-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

CARRERAS SEMIPRESENCIALES

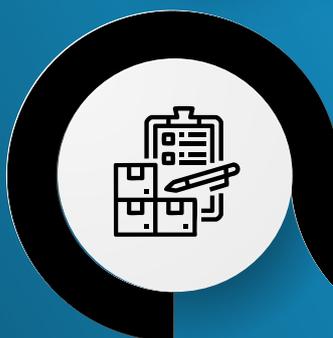


Instrumentación
Industrial

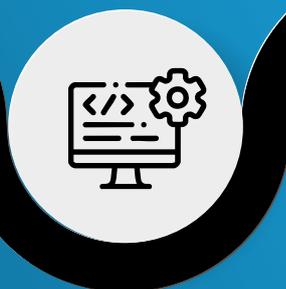


Mecánica
Industrial

CARRERAS A DISTANCIA



Logística
Digital
Integrada



Diseño y
Desarrollo
de **Software**



Big Data
y Ciencia
de Datos



Ciberseguridad
y Auditoría
Informática



Prevención de
la Seguridad y
Salud en el
Trabajo

Reducción de la contaminación
**orgánica expresada como
remoción de la Demanda
Química de Oxígeno
(DQO).**



Pretratamiento oxidativo de aguas residuales con carga orgánica procedentes de la ultrafiltración aplicada para fabricar leche deslactosada

Oxidative pretreatment of wastewater with organic load from ultrafiltration applied to manufacture lactose-free milk

RESUMEN

En la obtención de la leche sin lactosa, se tiene como proceso principal la ultrafiltración de la leche, lo que resulta, por un lado, leche sin lactosa (rechazo) y, por otro, la lactosa con agua y sales (permeado). Este último subproducto no es utilizado como materia prima, sino que constituye un efluente que aporta al caudal total de aguas residuales. Esto ha provocado un incremento de la demanda química de oxígeno (DQO) del efluente inicial, afectando a las etapas de tratamiento de los efluentes industriales, siendo la etapa de tratamiento biológico la más afectada, ya que la lactosa convertida en ácido láctico disminuye el pH del sistema, esto lleva a que los microorganismos no realicen una buena degradación.

El siguiente estudio se centró en realizar un pretratamiento del agua residual cargada de lactosa que fue el permeado de la ultrafiltración que logra deslactosar la leche; específicamente, se busca reducir la contaminación orgánica expresada como remoción de la DQO. La metodología empleada en la investigación fue de tipo aplicada, enfoque cuantitativo, diseño experimental. Se utilizó los procesos de oxidación avanzada de Fenton convencional y de ozonización, y se tuvo como objetivo seleccionar aquel proceso que permita la remoción del DQO a valores por debajo de 3 000 mg/L, para que así pueda pasar a la planta de lodos activados ya existente y puedan ser soportados por los microorganismos dichos niveles de DBO.

Los resultados obtenidos para ambas pruebas realizadas en los laboratorios de Tecsup n.º 1, aplicando el método de oxidación avanzada Fenton, dieron como resultado la remoción máxima de 64 % para Fenton y 39 % para la ozonización, pero esto no fue suficiente debido a la gran estabilidad del disacárido en dosis bajas y una oxidación completa a dosis altas formando productos intermedios solubles que son difíciles de remover en el proceso posterior de coagulación y floculación. Además, el tiempo necesario para oxidar a la lactosa, a productos intermedios

insolubles, es de 30 minutos con la dosis de 1196 mg/L de H_2O_2 , 2000 mg/L de $FeSO_4$ y a pH igual a 3. Esta prueba llegó a reducir gran parte de la materia orgánica, hasta 7280 mg/L DQO, mas no se logró obtener la remoción objetivo de reducir el DQO hasta 3000 mg/L, pero la reducción lograda puede ser mezclada con cierta corriente de agua ya tratada que recircule al reactor y así pueda proceder el tratamiento biológico; esto último ya sería un estudio que haría la compañía de lácteos.

ABSTRACT

The main process used in obtaining lactose-free milk is ultrafiltration, which results in lactose-free milk (retentate) on one side, and lactose with water and salts (permeate) on the other. This last by-product is not used as raw material, but constitutes an effluent that contributes to the total flow of wastewater. This has caused an increase in the chemical oxygen demand (COD) of the initial effluent, affecting the treatment stages of industrial effluents, with the biological treatment stage being the most affected, since the lactose converted into lactic acid decreases the pH of the system, this leads to the microorganisms not carrying out a good degradation.

The following study focused on pretreatment of the lactose-laden wastewater that was the permeate of the ultrafiltration that manages to de-lactose the milk, specifically seeking to reduce organic contamination expressed as removal of COD. The methodology used in the research was applied, quantitative approach, experimental design; where the conventional Fenton advanced oxidation and ozonation processes were used, and the objective was to select that process that allows the removal of COD at values below 3,000 mg/L, so that it can be passed to the production plant activated sludge that already exists and can be supported by the microorganisms at these BOD levels.



Palabras Claves

Tratamiento de aguas residuales, VMA, DQO, pH, dosis, proceso Fenton, oxidación avanzada, ozonificación, lactosa.

Key words

Wastewater treatment, VMA, COD, pH, dose, Fenton Process, Advanced oxidation, ozonation, lactose.

The results obtained for both tests carried out in the TECSUP No. 1 laboratories, applying the Fenton advanced oxidation method, resulted in the maximum removal of 64 % for Fenton and 39 % for ozonation, but this was not enough due to the great stability of the disaccharide at low doses and complete oxidation at high doses forming soluble intermediate products that are difficult to remove in the subsequent coagulation and flocculation process. Furthermore, the time necessary to oxidize lactose, to insoluble intermediate products, is 30 minutes with the dose of 1196 mg/L of H₂O₂, 2000 mg/L of FeSO₄ and at pH equal to 3. This test successfully reduced much of the organic matter, down to 7,280 mg/L COD, but the target removal of reducing COD to 3,000 mg/L was not achieved. However, the reduction obtained could be mixed with a certain flow of already treated water circulating back into the reactor, allowing the biological treatment to proceed. This latter step would be a study conducted by the dairy company.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar un pretratamiento oxidativo adecuado y viable para las aguas residuales generadas por la ultrafiltración en la producción de leche deslactosada, de modo que puedan ser tratadas en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En la empresa de productos lácteos, la actividad industrial ha aumentado tras el lanzamiento de un nuevo producto de leche sin lactosa, que se obtiene mediante un proceso de ultrafiltración que elimina la lactosa, conservando los otros componentes de la leche (proteínas, vitaminas y minerales). El subproducto extraído, la lactosa, se trata como desecho en la planta de tratamiento de efluentes industriales. Estos residuos líquidos han incrementado con el aumento de la producción, generando aguas residuales con concentraciones de 3000 mg/L, mientras que el efluente de la ultrafiltración presenta hasta 20 000 mg/L.

La alta carga orgánica, debido a la presencia de lactosa, ha afectado significativamente el efluente. Así, la calidad del agua al final del tratamiento no cumple la normativa vigente, ya que la turbiedad excede el límite máximo permisible (LMP). Los sistemas de tratamiento secundarios actuales, basados en microorganismos, no resultan suficientes ni eficaces para el tratamiento del permeado de ultrafiltración, compuesto en su mayoría por lactosa, ácido láctico y otros compuestos orgánicos (incluidas pequeñas partículas coloidales). Esta baja eficiencia se debe a que, al consumir lactosa, las enzimas bacterianas, como la lactasa, producen ácido láctico, lo que reduce el pH hasta aproximadamente 5 en el tratamiento biológico, disminuyendo la actividad de los microorganismos, que funcionan óptimamente a valores de pH entre 5,8 y 9. Esto genera una baja eficiencia en la degradación de la materia orgánica.

Además, el tratamiento fisicoquímico (primario) presenta baja retención, dado que entre el 80 y el 85 % de la materia orgánica biodegradable se encuentra disuelta, lo que limita la acción del coagulante en este efluente.

En conclusión, la planta de tratamiento no está preparada para recibir un efluente de estas características. Por ello, la presente investigación tiene como finalidad encontrar una solución de pretratamiento para dichos efluentes antes de su ingreso al tratamiento biológico junto con otros efluentes de carga orgánica.

Los objetivos del presente estudio son los siguientes:

Objetivo general:

- Evaluar un pretratamiento oxidativo técnicamente viable para las aguas residuales generadas por la ultrafiltración en la producción de leche deslactosada, que se destinarán al tratamiento biológico en la planta de tratamiento.

Objetivos específicos:

- Caracterizar el agua residual mediante análisis fisicoquímicos: conductividad, pH, sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.
- Evaluar el agua residual usando la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Aplicar diversos tratamientos oxidativos al agua residual para maximizar la remoción de DQO y facilitar su ingreso a la PTAR.
- Identificar la tecnología de tratamiento de agua residual más eficiente para alcanzar la remoción de DQO necesaria, permitiendo derivar el efluente al reactor biológico.

FUNDAMENTOS

Antecedentes

La industria láctea es una de las más contaminantes, ya que genera una alta carga de desechos líquidos que incluyen grasas, proteínas, residuos de lavados de tanques, azúcares, entre otros. Si estos desechos se vierten directamente, pueden causar graves daños en los cuerpos receptores. Por ello, el vertido del efluente tratado industrial hacia un cuerpo receptor es controlado y monitoreado por la Organización de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), que verifica el cumplimiento de los límites máximos permisibles (LMP).

La incorporación del permeado de leche, obtenido por ultrafiltración, en la planta de tratamiento de efluentes industriales ha generado dificultades en el resultado del efluente tratado. Los altos niveles de azúcares en este permeado, principalmente lactosa, dificultan el tratamiento, ya que el permeado presenta una DBO (demanda bioquímica de oxígeno) entre 3000 y 4500 mg/L [15].

Además, el permeado de leche por ultrafiltración representa un problema ambiental debido a su alta carga orgánica, mayormente de lactosa, por lo que no puede descargarse en cuerpos de agua sin un tratamiento previo [14].

La lactosa, que representa alrededor del 88 % del permeado en la producción de leche deslactosada, constituye una carga orgánica elevada. Por ello, se propone un pretratamiento de la lactosa mediante procesos avanzados de oxidación, como la ozonización y el método de Fenton convencional, como alternativas para su degradación.

Tabla 1
LMP según la normativa ambiental D. S. N°003-2010 Ministerio de Ambiente

Parámetro	Unidad	LMP de efluentes para vertidos a cuerpo de aguas
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	10 000
Demanda bioquímica de oxígeno	mg/L	100
Demanda química de oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6,5 – 8,5
Sólidos totales en suspensión	mg/L	150
Temperatura	°C	<35

Fuente: [12].

Características fisicoquímicas y biológicas del efluente lácteo

A. Sólidos disueltos (SDT): Pequeñas partículas de ciertos materiales en aguas residuales pueden disolverse, como la sal en el agua. Algunos materiales disueltos son consumidos por microorganismos, pero otros, como los metales pesados, son difíciles de eliminar con tratamiento convencional. Cantidades excesivas de sólidos disueltos en las aguas residuales pueden tener efectos adversos en el medio ambiente [13].

B. Sólidos suspendidos (SST): Materiales que resisten la sedimentación y permanecen suspendidos en las aguas residuales. Estos sólidos deben tratarse, ya que obstruyen los sistemas de absorción del suelo o reducen la efectividad de los sistemas de desinfección [13].

C. Turbidez: Se refiere a aguas que contienen materia suspendida que interfiere con el paso de la luz o limita la profundidad visual. [8] La turbidez se mide en NTU (unidad nefelométrica de turbidez).

D. Conductividad: Expresión numérica de la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica, que depende de la presencia de iones y de su concentración, movilidad, carga y temperatura [3].

E. pH: La acidez o alcalinidad de las aguas residuales afecta tanto al tratamiento como al medio ambiente. El pH debe mantenerse entre 6 y 9 para proteger a los organismos, ya que los ácidos y otras sustancias que lo alteran pueden inactivar los procesos de tratamiento [13].

F. Temperatura: Indicador de la calidad del agua que influye en otros parámetros, como el pH, el déficit de oxígeno, la conductividad eléctrica y otras variables fisicoquímicas [5].

G. Demanda bioquímica de oxígeno: Mide la capacidad de las bacterias para digerir materia orgánica en un período de incubación de 5 días a 20 °C, analizando la disminución de oxígeno. Este parámetro cuantifica la materia orgánica biodegradable y se expresa en mg/L [9].

El valor de la DQO (demanda química de oxígeno) siempre será superior al de la DBO, ya que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

Las relaciones entre DQO y DBO permiten determinar el tipo de contaminación:

- Si la relación DBO/DQO es menor de 0,2, se trata de vertidos de naturaleza industrial y poco biodegradables, por lo que conviene aplicar tratamientos fisicoquímicos.
 - Si la relación DBO/DQO está entre 0,20 y 0,50, se recomienda un tratamiento combinado o solo con sistema biológico. En este caso, es importante considerar el área disponible, la inversión y los costos operativos para decidir la técnica de tratamiento.
 - Si la relación DBO/DQO es mayor de 0,60, el vertido es más biodegradable y puede tratarse mediante tratamientos biológicos.
- H. Demanda química de oxígeno (DQO):** Mide la capacidad de una solución de dicromato de potasio caliente para oxidar la materia orgánica, incluyendo tanto la biodegradable como la refractaria (no biodegradable). Se expresa en mg/L [9].

Química de la lactosa

La lactosa es un disacárido exclusivo de las leches, incluida la humana, compuesto por una molécula de glucosa y una de galactosa. Al conservar el grupo aldehído de la galactosa, actúa como un azúcar reductor.

A. Características fisicoquímicas de la lactosa

La lactosa, el principal carbohidrato en la leche de la mayoría de las especies, también se conoce como «el azúcar de la leche». La leche contiene aproximadamente entre 45 y 50 gramos de lactosa por litro. Este componente es el más vulnerable al ataque de microorganismos, transformándose principalmente en ácido láctico y en otros ácidos alifáticos [2].

B. Propiedades químicas de la lactosa

- **Propiedades reductoras:** La lactosa es un azúcar reductor porque contiene un grupo aldehído libre. Esto se puede comprobar mediante la prueba de Fehling, en la cual se observa una reducción parcial del licor cuproalcalino de Fehling.
- **Hidrólisis química:** La hidrólisis de la lactosa es difícil debido a su estabilidad frente a agentes químicos. Sin embargo, puede descomponerse mediante ácidos fuertes en caliente o con la enzima lactasa [2].
- **Degradación térmica de la lactosa:** Entre 110 °C y 130 °C, la lactosa pierde agua, a 150 °C se torna amarilla y a 175 °C se carameliza, oscureciéndose por completo. Algunas levaduras pueden producir lactasa.

Posibles soluciones

Debido al efecto de la lactosa en la disminución del pH, es necesario tratar los residuos de ultrafiltración mediante etapas adicionales que eliminen o transformen la lactosa en compuestos más fáciles y rápidos de procesar. Se proponen los procesos de oxidación avanzada (POA) como una alternativa, seguida de coagulación y floculación.

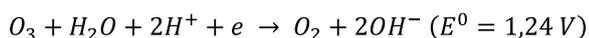
Método de oxidación con ozono

El ozono es un agente altamente oxidante que se emplea en el tratamiento de aguas residuales para el control de olores, la oxidación de contaminantes orgánicos e inorgánicos y la desinfección de efluentes. Es un gas muy inestable y poco soluble en agua, que se produce a partir de moléculas de oxígeno mediante descarga eléctrica o radiación ultravioleta (UV). Sus reacciones en el sistema acuoso son complejas, ya que implican transferencia de masa gas-líquido, autodescomposición y reacciones con compuestos inorgánicos y orgánicos suspendidos o disueltos [11].

Cuando el ozono se disuelve en agua, actúa como un agente altamente oxidante con un potencial de reducción estándar de 2,07 V. Reacciona con componentes orgánicos e inorgánicos presentes en la solución a través de dos vías principales: como ozono molecular (directo) y mediante radicales hidroxilo (indirecto). Las reacciones directas son más selectivas, mientras que las de los radicales hidroxilo constituyen una oxidación avanzada.

Las reacciones del ozono molecular en solución acuosa se clasifican en tres categorías: oxidación-reducción, cicloadición dipolar y sustitución electrofílica. El ozono puede oxidar numerosos compuestos, como hierro, manganeso, sulfuro y bromuro, a través de reacciones de oxidación-reducción [4].

Las principales reacciones son las siguientes:

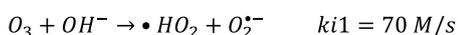


Se sabe que el ozono ataca los dobles enlaces (C=C) en moléculas orgánicas, como olefinas y compuestos aromáticos, formando un intermediario cíclico llamado ozónido, que luego sufre reacciones de ozonólisis anormal y produce moléculas más pequeñas, como cetonas, aldehídos o ácidos carboxílicos [10].

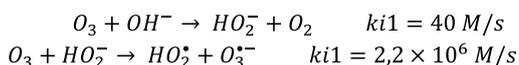
Además de estas reacciones directas entre ozono y compuestos contaminantes en el tratamiento de aguas residuales, las moléculas de ozono se descomponen en varios productos radicales que reaccionan con los contaminantes del efluente. Este proceso genera radicales libres, como el radical hidroxilo (OH·).

Existen dos reacciones principales de iniciación, cuya ocurrencia depende del pH del medio en el que se produce la reacción.

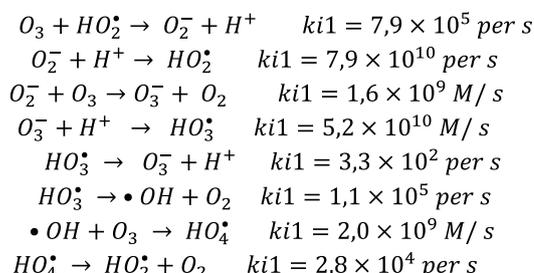
pH ácido a neutro:



pH alcalino:



Normalmente, estas reacciones de iniciación avanzan de manera limitada debido a la lentitud de las reacciones entre las moléculas de ozono y el ion hidroxilo (OH·). Sin embargo, en condiciones alcalinas, el ion hidroperóxido (HO₂⁻) reacciona con otra molécula de ozono más rápidamente que en las reacciones anteriores, produciendo un radical hidroperóxido (HO₂[•]), que luego se descompone en otro radical libre. Esto permite que las reacciones en cadena se extiendan, como:



Así lo mismo, se afirma que, en condiciones alcalinas, se genera el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) que es mencionada por las siguientes reacciones:



El peróxido de hidrógeno es, en realidad, un precursor y catalizador en la descomposición del ozono, siendo la base del proceso de oxidación avanzada (POA) de (O₃/H₂O₂), que genera radicales hidroxilo. Este radical tiene un potencial de oxidación superior (2,8 V) al del ozono molecular y puede atacar compuestos orgánicos e inorgánicos de forma no selectiva, con tasas de reacción muy elevadas [1].

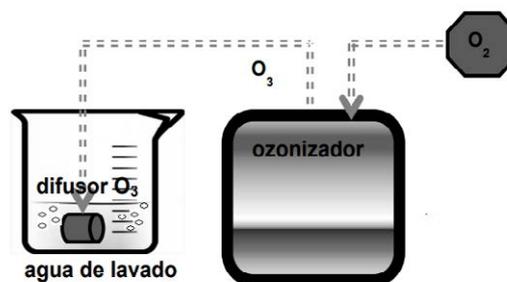


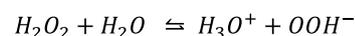
Figura 1. Proceso de oxidación de la lactosa con el ozono

Fuente: [1].

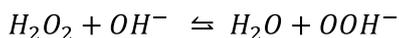
Método de Fenton convencional (Fe/H₂O₂)

En este método, se utiliza el peróxido de hidrógeno como agente oxidante o decolorante para la lactosa, que presenta un color amarillento cristalino, así como para otras biomoléculas provenientes de la ultrafiltración y algunas sales disueltas.

El peróxido de hidrógeno, al hidrolizarse, actúa como un ácido débil con un valor de pK = 11,64 y se ioniza en la siguiente reacción:

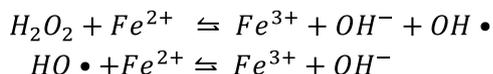


De tal forma que, en medios básicos el peróxido de hidrógeno produce el ion hidroperóxido, que se representa en la siguiente reacción:

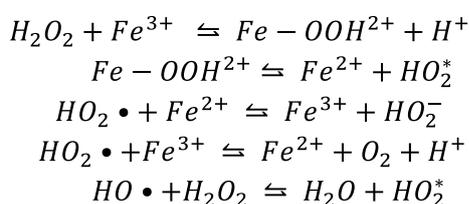


El ion hidropéroxido actúa como el agente oxidante de las moléculas, dado su alto potencial estándar de redox.

Cuando se añade peróxido de hidrógeno a un medio ácido junto con una sal ferrosa, se generan radicales hidroxilo mediante una reacción conocida como proceso Fenton. Este método comprende las siguientes reacciones:



A pH menor a 3, la reacción es autocatalítica, debido a que el hierro (III) descompone al peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua a través de un mecanismo en cadena [16].



Como se observa, el proceso puede comenzar la reacción con el Fe (III), sin embargo, es muy lenta y forma el radical perhidroxilo $HO_2 \cdot$ el cual es mucho menos reactivo que el $\cdot OH$. A pH > 5, se genera precipitación del Fe^{3+} [13].

METODOLOGÍA

Muestreo del efluente

La extracción del efluente se realizó mediante «muestreo puntual», obteniendo muestras individuales (M1, M2, M3) en días distintos, sin mezclarlas entre sí. Este efluente, denominado permeado, proviene del flujo de salida del equipo de ultrafiltración de la leche. Las muestras fueron transportadas a las instalaciones de Tecsup en un cooler a 4 °C y luego conservadas en un frigorífico a la misma temperatura. Es importante destacar que las muestras se recolectaron en distintos meses.

Procedimiento de la caracterización de la muestra

A. Descripción de la muestra: La muestra presenta un color amarillento verdoso claro, con una leve viscosidad y un olor característico.

B. Determinación del pH: La medición del pH se realizó con un potenciómetro, mostrando valores entre 5,5 y 6,0 en cada muestreo del efluente.

C. Temperatura: La temperatura del efluente es crucial, ya que, si aumenta, puede provocar la cristalización de la alfa-lactosa, dificultando la oxidación homogénea y el contacto eficaz entre la lactosa y el oxidante.

D. Determinación de sólidos totales y sólidos suspendidos: El procedimiento se detalla en los diagramas de flujo de las figuras 2 y 3:

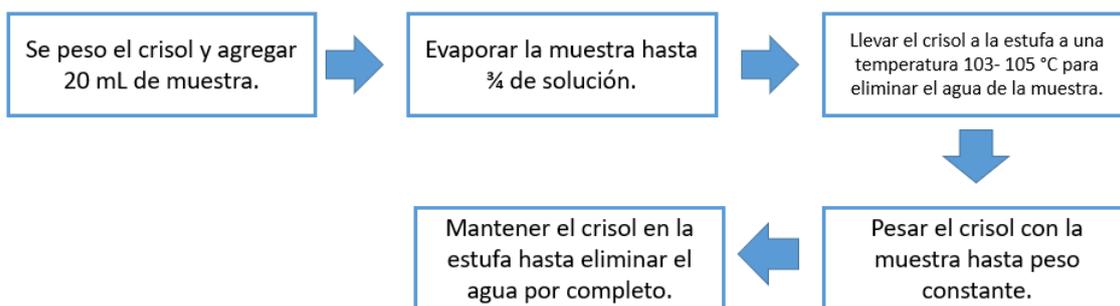


Figura 2. Pasos en la determinación de sólidos totales (ST)

Fuente: Elaboración propia.

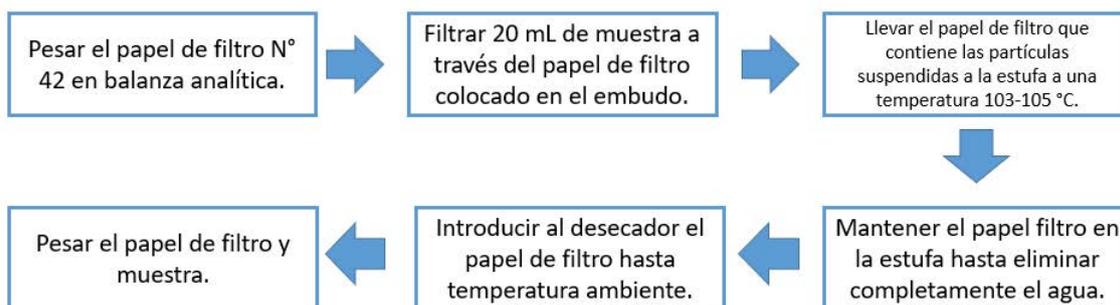


Figura 3. Pasos en la determinación de sólidos suspendidos totales (SST)

Fuente: Elaboración propia.

E. Conductividad: La conductividad del efluente varía entre 10 y 15 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere que podría ser tratado fácilmente mediante un tratamiento biológico, ya que su baja conductividad indica una menor presencia de sales. Como se mencionó anteriormente, en el proceso de ultrafiltración de la leche, se separan la lactosa junto con el agua y algunas sales (como calcio y otros iones).

F. Determinación de la DQO: La demanda química de oxígeno (DQO) se mide como el oxígeno necesario para degradar la materia orgánica biodegradable y no biodegradable, utilizando dicromato de potasio como oxidante en un medio ácido. La metodología empleada para este parámetro es el método de reflujo cerrado o colorimétrico, utilizando viales de DQO con rangos de 200 mg/L a 15 000 mg/L.

Tabla 2
Detalles de medida del método colorimétrico para la realización de medida de DQO

Rango de medida de DQO (mg/L)	Volumen de muestra (mL)	Lectura de colorímetro multiplicada por
20-1500	2	1 (Lectura directa)
200-15 000	0,2	10

Fuente: [9].

En las mediciones de la DQO de la muestra estuvo en el rango de 19 000 mg/L a 23 000 mg/L.

con grageas de KOH, que absorben el CO_2 producido por las bacterias al degradar la materia orgánica, evitando interferencias en la medición de la variación de presión del oxígeno [9].

G. Determinación de DBO por el método piezoeléctrico:

El método empleado para medir la DBO fue mediante un equipo respirométrico, que determina el resultado a partir de la variación de presión por el consumo de oxígeno. El procedimiento es el siguiente: primero, se diluye la muestra en una proporción adecuada, siempre que esté dentro del rango de determinación, según el criterio establecido:

Finalmente, las botellas se colocan en el equipo respirométrico y los resultados se obtienen después de 5 días a una temperatura de 20 °C. Para obtener el valor final de la DBO, el resultado registrado a los 5 días se multiplica por el factor de dilución. La DBO de la muestra resultó entre 17 600 mg/L y 18 568 mg/L.

Tabla 3
Detalles de medida del método colorimétrico para la realización de medida de DBO

Rango de medida del DBO (mg/L)	V en botella (mL)
0-70	355
0-350	160
0-700	95

Fuente: [9].

Resultados de la caracterización del efluente

Luego, se extrae la muestra diluida según el rango elegido previamente y se vierte en una botella ámbar, asegurándose de que los materiales estén secos y limpios. Se añade una pastilla magnética y un nutriente al frasco. La botella se cierra

A partir de los resultados obtenidos, se calculó el promedio de varias muestras, como se muestra en la tabla 4. Se observa que la muestra presenta un alto valor de sólidos disueltos totales (SDT), principalmente debido a la presencia de lactosa disuelta y algunas sales (sodio y calcio). Al calcular el porcentaje de la relación DBO/DQO, se obtuvo un 88,22 %. Dado que el efluente tiene una DBO superior a 3000 mg/L, se considera no apto para un tratamiento biológico aeróbico.

Los métodos de oxidación avanzada aplicados a este efluente fueron el método Fenton y la ozonización, siendo el método Fenton el más eficiente debido a su alta capacidad de remoción en comparación con la ozonización.

Tabla 4
Caracterización del efluente promedio

Parámetro	Unidad	Resultados
pH	-----	5,40-6,00
DBO	mg/L	17 600
DQO	mg/L	19 950
SST	mg/L	2,62
SDT	mg/L	205,50
ST	mg/L	208,12
Conductividad específica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	10,37
ORP	mV	162,80
Turbiedad	NTU	16,23

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de tratamiento de Fenton convencional

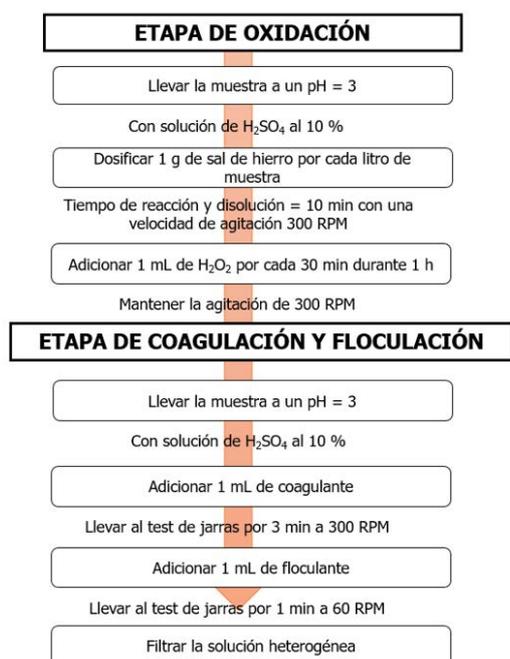


Diagrama de tratamiento por ozonización

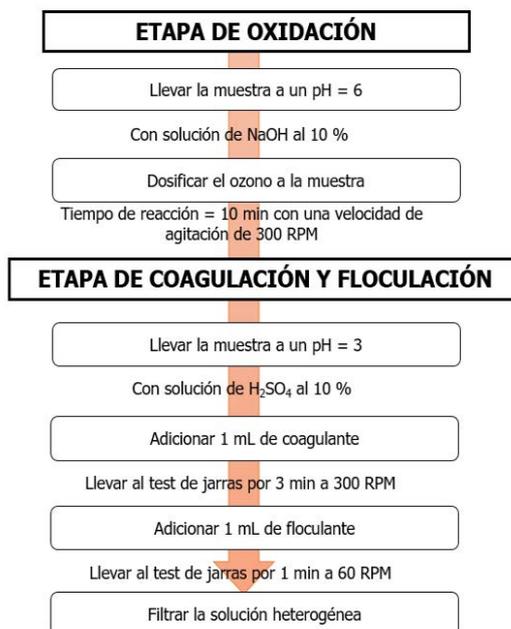


Figura 4. Diagramas de los métodos de tratamiento aplicados

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A continuación, se muestra los resultados obtenidos en las tablas 5 y 6:

Tabla 5
Condiciones de oxidación y coagulación variando el pH de oxidación y floculación

Prueba 1 (Variación de pH de oxidación)			
Condiciones de oxidación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
pH inicial	5,6	5,6	5,6
pH de trabajo	3	5	8
Temperatura (°C)	25	25	25
Volumen de muestra (mL)	1000	1000	1000
Condiciones de coagulación y floculación			
pH de trabajo	2,5	4,12	7,2
r. p. m. de coagulación	300	300	300
r. p m. de floculación	60	60	60
Tiempo de coagulación (min)	3	3	3
Tiempo de floculación (min)	1	1	1
Acerca de los reactivos utilizados			
HCl (mL) 20 %	22	3	42
NaOH (mL)	-	-	-
FeSO ₄ (s)	2,00	2,00	2,00
H ₂ O ₂ (mL) 50 % c/30min	1	1	1
Tiempo de adición de H ₂ O ₂ (h)	1	1	1
Reactivos de coagulación y floculación			
PAC (mL) al 16 %	2	2	2
Magnafloc al 0,1 %	0,5	0,5	0,5
Turbiedad final (NTU)	10,25	15,35	18,45

Tabla 6
Comparación de resultados de los diferentes pH de coagulación manteniendo constante el pH = 3 de oxidación

Prueba 2 (Variación de pH de coagulación-floculación)			
Condiciones de oxidación	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
pH inicial	5,6	5,6	5,6
pH de trabajo	3	3	3
Temperatura (°C)	25	25	25
Volumen de muestra (mL)	500	500	500
Condiciones de coagulación y floculación			
pH de trabajo	3	5	8
r. p. m. de coagulación	300	300	300
r. p. m. de floculación	60	60	60
Tiempo de coagulación (min)	3	3	3
Tiempo de floculación (min)	1	1	1
Acerca de reactivos utilizados			
HCl (mL) 20 %	14	22	17
NaOH (mL)	-	-	-
FeSO ₄ (g)	2,00	2,00	2,00
H ₂ O ₂ (mL) 50 % c/30 min	1	1	1
Tiempo de adición de H ₂ O ₂ (h)	1	1	1
Reactivos en etapa de coagulación y floculación			
NaOH (mL) 10 %	0	18	40
PAC (mL) 16 %	2	2	2
Magnafloc 0,1 %	0,5	0,5	0,5
Resultados			
Turbiedad (NTU) final	20,5	8,76	43,6

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, las condiciones óptimas para la aplicación del método Fenton convencional, deducidas del análisis de la Tabla 5, indican que el valor de pH óptimo para la oxigenación es de 3, ya que a este pH se logra la menor turbidez final. Las pruebas posteriores se realizaron con este valor de pH. Además, se observó que, al duplicar la dosis de peróxido de hidrógeno, las condiciones variaron entre las pruebas, trabajándose inicialmente con 1000

mL de muestra de agua residual (tabla 5) y luego con 500 mL (tabla 6).

A continuación, en las tablas 7, 8 y 9, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para la remoción de materia orgánica (lactosa) mediante el método Fenton convencional.

Fenton convencional

Tabla 7
Determinación de DQO para diferente dosis de peróxido de hidrógeno, a pH = 3 de oxidación, con 60 min de reacción y 2000 mg/L FeSO₄

Variando la dosificación de peróxido de hidrógeno				
Volumen (mL)	0,5	1,0	2,0	3,0
Dosis(mg/L)	598	1 196	2 392	3 588
DQO (mg/L)	10 520	7 280	8 160	9 300
Turbiedad (NTU)	1,81	3,64	5,83	37,66
Remoción (%)	47	64	59	54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Determinación de DQO para diferentes dosificaciones de sulfato ferroso, a pH = 3 de oxidación, con 60 min de reacción y 1 196 mg/L de peróxido de hidrógeno

Variando la dosificación de sulfato ferroso				
Masa (g)	0,4	0,7	1,0	1,3g
Dosis(ppm)	800	1 400	2 000	2 600
DQO (mg/L)	10 780	9 960	7 280	10 880
Turbiedad (NTU)	1,81	3,64	5,83	37,66
Remoción (%)	46	50	64	46

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Determinación de DQO para distintos tiempos de reacción, a pH = 3 de oxidación, con 1196 mg/L de peróxido de hidrógeno y 2 000 mg/L de sulfato de ferroso

Variando el tiempo de oxidación				
Tiempo (minutos)	20	30	40	50
DQO (mg/L)	11 840	7 280	10 840	11 600
Turbiedad (NTU)	14,25	3,64	42,7	22,33
Remoción (%)	41	64	46	42

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las tablas 7, 8 y 9, se deduce que, para maximizar la remoción de DQO mediante el método Fenton convencional, se deben aplicar las siguientes condiciones: pH de 3, dosis de 1196 mg de peróxido de hidrógeno al 50 % por litro de agua residual, dosis de catalizador sulfato ferroso de 1 g/L y un tiempo de reacción en *batch* de 30 minutos en cada una de las dos etapas de reacción (2 reactores en serie). Con base en estos resultados, se recomienda optimizar las condiciones para

realizar pruebas en un sistema piloto que ajuste las condiciones experimentales.

Ozonización

En la tabla 10 y 11 se ordenan los resultados de las pruebas de ozonización, según lo siguiente:

Tabla 10

Determinación de DQO variando el pH, con 20 min de reacción y 2,5 g/L de ozono

Variando el pH de oxidación				
pH de ozonización	5	6	7	8
DQO(mg/L)	14 780	12 280	13 660	14 600
Turbiedad (NTU)	19,25	14,68	20,7	28,39
Remoción (%)	26	39	32	27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Determinación de DQO para distintos tiempos de reacción, a pH = 6 y 2,5 g/L de ozono

Variando el tiempo de oxidación (min)				
Tiempo (min)	10	15	20	25
DQO (mg/L)	11 340	11 920	12 280	15 200
Turbiedad (NTU)	15,68	18,75	14,68	37,56
Remoción (%)	43	40	39	24

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados en las tablas 10 y 11, se concluye que, para maximizar la remoción de DQO mediante ozonización, se debe trabajar a un pH de 6 y con un tiempo de reacción en *batch* de 10 minutos. Con base en estos resultados, se recomienda optimizar estas condiciones para realizar pruebas en un sistema piloto que ajuste los parámetros experimentales. Asimismo, se observa que el método Fenton ofrece una mayor remoción de DQO y mejores valores de turbidez final, por lo que se recomendaría como el método más eficaz en este estudio.

de remoción no fue suficiente debido a la alta estabilidad del disacárido en dosis bajas y a la formación de productos intermedios solubles en dosis altas, lo que dificulta su remoción en los procesos posteriores de coagulación y floculación.

- La optimización del método Fenton para el efluente lactosado se alcanzó mediante dos etapas con tiempos de retención *batch* de 30 minutos, utilizando una dosis de 1196 mg/L de H₂O₂, 2000 mg/L de FeSO₄ y pH 3 para la oxidación y la coagulación. Esta prueba logró reducir gran parte de la materia orgánica, alcanzando una DQO final de 7280 mg/L.
- Por lo tanto, el método Fenton puede ser utilizado como un pretratamiento para el efluente lactosado, permitiendo su dilución con otros flujos para ingresar al biorreactor y facilitar su remoción.

CONCLUSIONES

- Las pruebas realizadas con el método de oxidación avanzada Fenton mostraron una mayor remoción de DQO en comparación con la ozonización, alcanzando un máximo de 64 % y 39 %, respectivamente. Sin embargo, este nivel

- Queda pendiente el estudio de los caudales adicionales necesarios para mezclar con el efluente en cuestión y hacerlo apto para el biorreactor. El caudal final para ingresar al biorreactor deberá definirse en este balance pendiente.

REFERENCIAS

- [1] Adroezzi, R., Caprio V., Insola A., & Marotta R. (1999). Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery. *Revista Elsevier*, 51-55.
- [2] Alais, C. (2003). *Ciencia de la leche: Principios de técnica lechera* (4.ª ed.). Editorial Reverté.
- [3] APHA, AWWA & WPCF. (2005). *Métodos normalizados para análisis de aguas potables y residuales* (17.ª ed.). Díaz de Santos.
- [4] Beltrán, F. (2003). *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. Lewis Publishers.
- [5] Dirección General de Salud Ambiental (Digesa). *Gesta agua, grupo de estudio técnico ambiental: Propiedades organolépticas*. Digesa.
- [6] Enrique, J. (1998). *Análisis de aguas y desagües* (2.ª ed.). Banco de Libros, Dirección de Bienestar Universitario.
- [7] Tecsup. (2019). *Guía de laboratorio ambiental: Procedimiento para la determinación de la demanda química de oxígeno*. Tecsup.
- [8] Ikehata, K. & Li, Y. (2005). Ozone-based processes. *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment*, 5, 116-118.
- [9] Kemer, F. & McCallion, J. (1998). *Manual del agua: Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- [10] Litter, M. (2003). Tecnologías avanzadas de oxidación: Tecnologías solares. *Solar Safe Water*, 5, 83-85.
- [11] Loeb, B. *et al.* (2012). Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: A review. *Ozone: Science & Engineering*, 34, 64-77.
- [12] Ministerio del Ambiente. (25 de marzo de 2010). *Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM: Aprueban los límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. Diario Oficial *El Peruano*, 25 de marzo de 2010.
- [13] National Small Flows Clearinghouse (NSFC). (1997). *Pipeline: Small community wastewater issues explained to the public*, 8(4).

[14] Passoti, L. *et al.* (2017). La fermentación de la lactosa a etanol en suero de queso, permeado y concentrado por *Escherichia coli*. *Worldwidescience*, 1, 1-5.

[15] Renner, E. & Abd-El-Salam, M. H. (1991). Application of ultrafiltration in the dairy industry. *Dairy Science Section, Justus Liebig University, Giessen Germany*.

[16] Yatagai, T., Ohkawa, Y., Kubo, D. & Kawase, Y. (2017). Hydroxyl radical generation in electro-Fenton process with a gas-diffusion electrode: Linkages with electrochemical generation of hydrogen peroxide and iron redox cycle. *National Library of Medicine*, 52(1), 74-83.

ACERCA DE LOS AUTORES

Huguez Ames Ramírez

Ingeniero químico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, magister en Educación por la Universidad de Piura y especializado en Tratamiento de Aguas Residuales. Actualmente cursa un doctorado en Ingeniería y Ciencias Ambientales en la Universidad Agraria La Molina. Tiene experiencia en la industria química, metalúrgica y en el tratamiento de aguas residuales e industriales, trabajando en plantas de tratamiento de agua y relaves mineros. Ha sido docente en la Universidad Agraria La Molina, Universidad Privada del Norte, Universidad Continental, Universidad María Auxiliadora y Tecsup. Actualmente es ingeniero jefe de procesos en la PTAR Pachacútec de ACCIONA, destacada por su calidad de agua. Además, ha sido conferencista en eventos como Perumin y tiene publicaciones en revistas especializadas.

@ hames@tecsup.edu.pe

Yorsel Mayhua Soto

Ingeniera industrial egresada de la UPC, licenciada en Educación por la Universidad Enrique Guzmán y Valle la Cantuta, y magister en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible por la Universidad Nacional del Callao. Además, ha realizado diplomados en Derecho Ambiental y Fiscalización Ambiental en la Universidad Continental. Cuenta con experiencia en control de calidad en empresas como Kimberly Clark y Laboratorios SMASAC. Desde 2013, se desempeña como docente en el área de Minería y Procesos Químico-Metalúrgicos en Tecsup N° 1 Lima, donde trabaja en investigaciones y proyectos relacionados con el tratamiento de aguas y efluentes industriales, colaborando estrechamente con otros docentes en el desarrollo de soluciones ambientales.

@ ymayhua@tecsup.edu.pe

Ulises Quiroz Aguinaga

Profesor de la Universidad Nacional de Ingeniería UNI y miembro fundador de la Sociedad Peruana de Electroquímica. Las investigaciones que realiza se centran en la síntesis de nanomateriales y el desarrollo de materiales carbonosos para su uso en sensores electroquímicos. Adicionalmente, las investigaciones buscan la remoción de contaminantes del agua como colorantes, medicamentos y pesticidas mediante procesos de oxidación avanzada.

 uquiroz@tecsup.edu.pe

Recibido: 27-05-24
Revisado: 17-09-24
Aceptado: 21-10-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Metodologías y Técnicas de la Ciencia de Datos para el análisis de la brecha salarial de género.



Brecha salarial de género en el Estado peruano: un análisis desde la ciencia de datos

Gender Pay Gap in the Peruvian Government: an approach from Data Science

RESUMEN

El estudio tiene por objetivo analizar la existencia de la brecha salarial de género en el Estado peruano e identificar los perfiles de tales brechas a nivel de regiones con base a la información de datos abiertos proporcionada por la Autoridad Nacional del Servicio Civil (Servir), aplicando metodologías y técnicas de la ciencia de datos. La investigación fue de tipo aplicada cuantitativa, de nivel explicativo y de diseño no experimental longitudinal (2017-2021). La metodología de trabajo utilizada fue CRISP-DM (Cross Industry Standard). Durante el análisis exploratorio de datos, se encontró que a nivel nacional la participación de las mujeres está cerca de la paridad con un promedio del 47 %, en tanto que la brecha salarial de género en el Estado tenía una tendencia a la baja del 13 % (2017) a 11 % (2021) indicador mejor al promedio general de Latinoamérica que era de 14 % (2019 OIT), adicionalmente, cuando se revisan a nivel nacional pareciera que a mayor participación corresponde menor brecha, sin embargo, cuando se desagrega la información por regiones se evidencia heterogeneidad en participación y en la brecha salarial (rango intercuartílico para Apurímac de 25 % y Piura de 2 %) y de su evolución; en muchas regiones, la pandemia genera que se revierta o ralentice las mejoras en la brecha. Para determinar qué regiones tuvieron avances se utilizó un modelo de regresión lineal simple con base en el año, la pendiente negativa indicaría avances y la pendiente positiva retrocesos en el periodo bajo estudio. Las regiones que presentaron mejores avances fueron Moquegua, Huánuco y Áncash, en tanto que las que presentaron deterioro fueron Huancavelica, La Libertad y San Martín. Para determinar los perfiles de brecha, se utilizó el periodo 2021 y se añadieron variables obtenidas del INEI como el PBI per cápita y la cobertura por cada servidor público, el primer factor asociado al progreso de la región y el segundo asociado a los servicios del Estado, se determinaron dos clústeres con niveles medianos

de brecha alto(12,7 %) y bajo (8,9 %). La prueba de hipótesis no paramétrica de Brown-Mood permite concluir que existe la brecha salarial de género en el Estado peruano a pesar de contar con un marco legal que prohíbe la discriminación salarial.

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the existence of the gender wage gap in the Peruvian government and identify the profiles of these gaps at the regional level, based on open data provided by the National Authority of the Civil Service (Servir), applying data science methodologies and techniques. The research was applied and quantitative in nature, explanatory in level, and used a non-experimental longitudinal design (2017-2021). The methodology used was CRISP-DM (Cross Industry Standard). During the Exploratory Data Analysis it was found that at the national level the female participation is closed to parity getting an average of 47 % on the other hand, the gender pay gap in the Government had a downward trend from 13 % (2017) to 11 % (2021), an indicator better than the general average for Latin America which was 14 % (2019 ILO), additionally, the correlation showed that to more participation correspond less pay gap, however, when the information is disaggregated by regions, heterogeneity of the gaps is evident (interquartile range for Apurímac of 25 % and Piura of 2 %) and its evolution; in many regions the pandemic generates that the improvements in the gap are reversed or slowed down. To determine which regions made progress, a simple linear regression model was used based on the year; the negative slope would indicate progress, and the positive slope would indicate reversals in the period under study; the regions that made the best progress were Moquegua, Huánuco and Ancash, while those that showed deterioration were Huancavelica, La Libertad and San Martín. To identify the gap profiles, the year 2021 was used and



Palabras Claves

Brecha salarial de género, participación femenina, Ley de No discriminación por Género, valoración de puestos, limpieza e imputación de datos, regresión lineal, clustering, perfiles de brecha salarial.

Key words

Gender Pay Gap, female participation, Law of non-gender discrimination, Valuation of jobs, Cleaning and imputation of data, linear regression, clustering, profiles of pay gap.

variables obtained from the INEI were added, such as GDP per capita and coverage per public servant, the first factor associated with the progress of the region and the second associated with government services, therefore two clusters were determined with median values of pay gap high (12,7 %) and low (8,9 %). The Brown-Mood nonparametric hypothesis test implies that the pay gap exists regardless of the labor laws that banning the discrimination of rewarding in the labor market.

y la desigualdad (la pobreza femenina prolonga el ciclo de la pobreza), y armonía social (la igualdad de oportunidades favorece el desarrollo pleno en los ámbitos personal y profesional) [14].

Según ONU Mujeres, las causas de la brecha salarial incluyen el empleo a tiempo parcial, trabajos peor remunerados, ocupaciones socialmente menos valoradas, la autoinfravaloración y la falta de conocimiento por parte de los empleados [14].

Claudia Goldin, premio Nobel de Economía 2023, revisó 200 años de historia económica de Estados Unidos y encontró hallazgos que solo pueden observarse en series de tiempo muy prolongadas. Por ejemplo, a comienzos del siglo xx, con los datos disponibles, se concluyó que una mayor participación femenina impulsa el crecimiento, lo que a su vez fomenta una mayor participación y reduce la brecha salarial. La perspectiva innovadora de Goldin permitió identificar variables que determinan la evolución de la participación y la brecha salarial, basándose en grandes cambios estructurales, como las revoluciones industriales y los cambios sociales. Esta revisión cuestiona el supuesto de la relación directa entre participación, crecimiento y brecha salarial, y se denomina la «Curva U», presentada en la figura 1. Goldin identificó que, en el inicio de la revolución industrial, las exigencias del trabajo alejaron a las mujeres casadas con hijos, quienes encontraron muy difícil equilibrar las tareas del hogar con las del trabajo en las fábricas [16].

INTRODUCCIÓN

La brecha salarial de género es un problema económico, social y laboral que se manifiesta en la diferencia de remuneraciones entre mujeres y hombres por trabajos similares. Para su cálculo, es necesario agregar valores, homogeneizar las bases de ingresos brutos (fijos, variables, gratificaciones, etc.) y ajustar las jornadas laborales (contratos a tiempo completo en comparación con los parciales). Las Naciones Unidas, a través de ONU Mujeres, aborda estos aspectos [14].

La importancia de abordar este problema abarca varias dimensiones. ONU Mujeres identifica los siguientes motivos: respeto a los derechos humanos (el principal), productividad (un salario justo contribuye a la motivación), lucha contra la pobreza

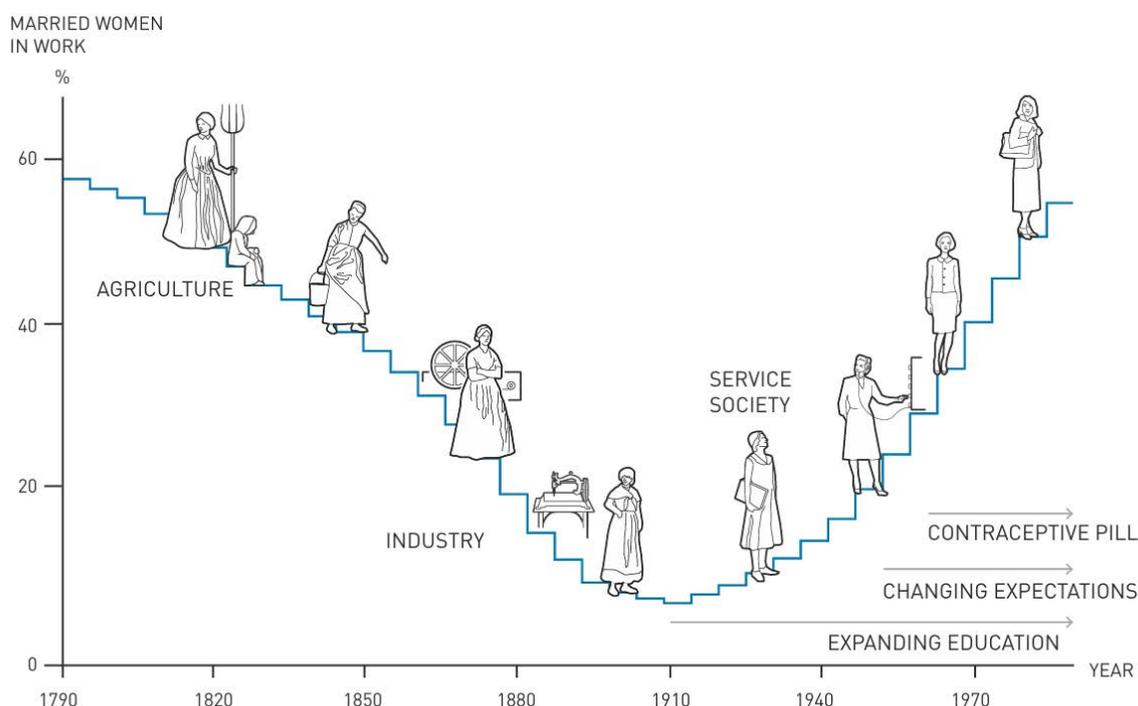


Figura 1. Curva U de la participación de la mujer en el mercado laboral americano

Fuente: [17].

Otro hallazgo de Goldin es que, a partir de la década de 1970, los cambios en las expectativas, el uso de métodos anticonceptivos y una mayor inversión en educación tuvieron un impacto significativo. Al analizar a hombres y mujeres con un MBA, Goldin pudo identificar que, en los primeros años tras la graduación, la brecha salarial era pequeña. Sin embargo, la diferencia comenzó

a surgir a partir de la maternidad, cuando las mujeres asumen la mayor parte de la responsabilidad en la crianza de los hijos, lo que les resta tiempo y dificulta desempeñarse en trabajos competitivos de tiempo completo, que a menudo requieren tiempo e inversiones adicionales. Esta brecha es la que no logra cerrarse con el paso de los años, como se muestra en la figura 2.

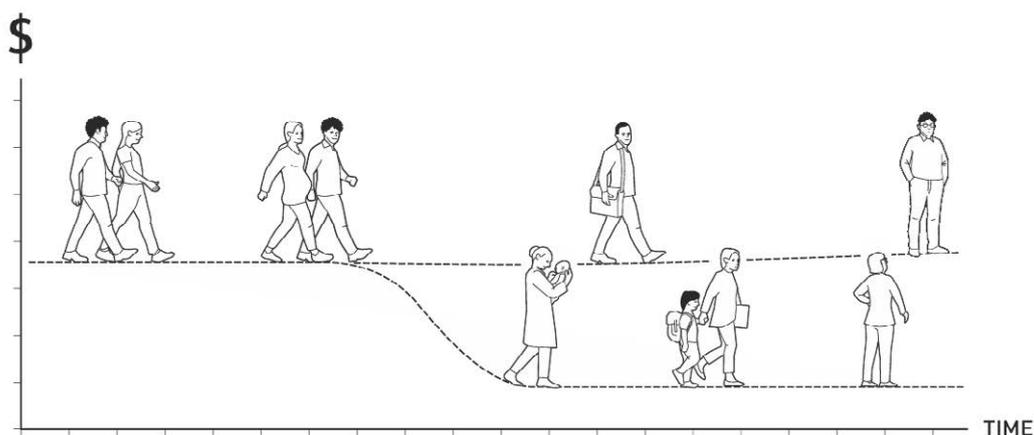


Figura 2. Efecto de la maternidad en la brecha salarial

Fuente: [17].

Trabajos posteriores basados en el estudio de Goldin, aplicados a otros países de altos ingresos con datos históricos disponibles, mostraron resultados similares, incluida la aparición de la típica curva en U de participación femenina, que relaciona el PIB per cápita (log) como variable independiente con la participación femenina como variable dependiente. La figura 3 muestra este gráfico característico en forma de U. El trabajo de Goldin proporciona un esquema que abarca la transformación estructural (industrialización, expansión de los empleos de oficina), los cambios tecnológicos que afectan la naturaleza del trabajo, las normas y expectativas sobre la responsabilidad del cuidado de los hijos, las oportunidades educativas y los cambios institucionales que eliminan barreras para el acceso y desarrollo de las mujeres en el mercado laboral. La Academia de Ciencias

de Suecia menciona acertadamente que la brecha salarial no es solo un problema de equidad normativa, sino que también afecta la asignación eficiente de recursos al no aprovechar el talento de manera óptima, lo cual promueve el desarrollo de las mujeres y genera un impacto positivo en el PIB de los países [16]. El trabajo de Goldin también plantea retos para los responsables de políticas públicas, quienes deben fomentar la flexibilidad necesaria para reducir la brecha generada por la maternidad. En países en vías de desarrollo, como Perú, el desafío es aún mayor: se deben identificar variables de largo plazo en tres dimensiones —estructuras sociales, económicas y derechos— que en los países desarrollados tomaron décadas, pero que los países en desarrollo deben abordar de forma acelerada, equilibrando expectativas y realidades en estas dimensiones.

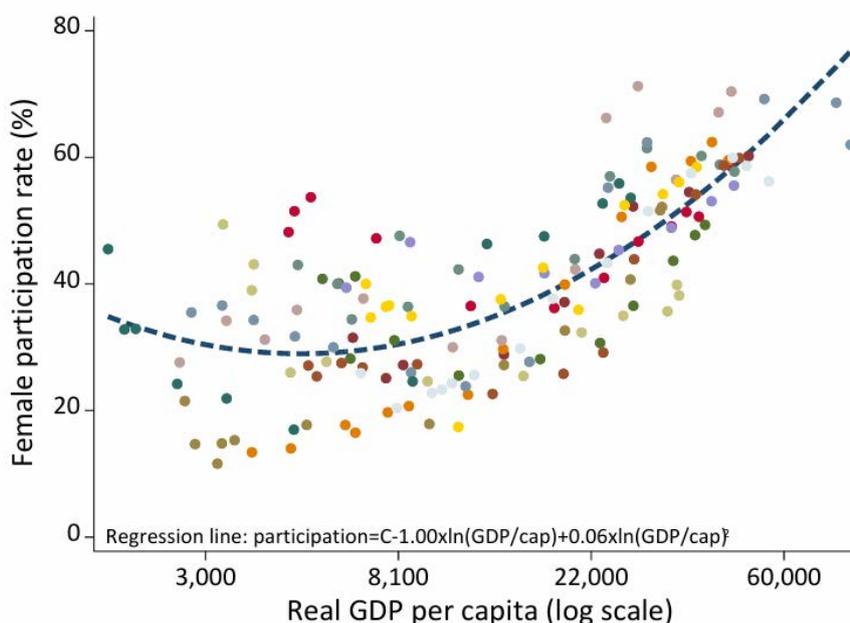


Figura 3. Participación femenina vs. PBI per cápita real (log) para 14 países industrializados en el periodo 1890-2005

Fuente: [16].

La OIT publica anualmente su Panorama Laboral. En la edición de 2020, se revisa la brecha salarial de género en los países de América Latina y el Caribe. Con base en sus datos, se ha elaborado la tabla 1, en la que se observa un avance significativo desde 2013 (18,3 %) hasta 2019 (14 %) [12].

Tabla 1
Brecha salarial en América Latina y el Caribe elaborado con base al informe OIT 2020

Año	Rem. mujer / rem. hombre	Brecha salarial
2013	84,5 %	18,3 %
2014	83,7 %	19,5 %
2015	86,2 %	16,0 %
2016	85,0 %	17,6 %
2017	86,0 %	16,3 %
2018	87,8 %	13,9 %
2019	87,7 %	14,0 %

Fuente: Elaboración propia.

En la edición 2024, la OIT [13] analiza el trabajo no remunerado e indica que, en América Latina, el número de horas semanales dedicadas a este tipo de trabajo oscila entre 22 y 43 para las mujeres, mientras que para los hombres está entre 10 y 20 horas. Este trabajo ocurre, principalmente, en los hogares. Un aspecto interesante del informe es que destaca el papel de las organizaciones privadas en la reducción de la brecha salarial, e indica acciones que deben incorporarse en la gestión de personas y en el cambio cultural, como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Políticas empresariales para la reducción de la brecha salarial de género

Fuente: [13].

A nivel latinoamericano, el estudio de Urquidi y Chalup (2023) concluye que, según las encuestas armonizadas de hogares del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), las mujeres deberían tener un ingreso por hora superior al de los hombres, considerando su nivel educativo, los sectores de la economía en los que trabajan y las ocupaciones. Las diferencias se atribuyen a sesgos discriminatorios y a la falta de normativa laboral. El mismo estudio calcula que, para Perú en 2019, que la participación femenina agregada fue del 43 %. En cuanto a la brecha salarial general en Perú, aplicando la metodología de Blinder-Oaxaca, se estima en -30 %, y el análisis de descomposición muestra que las variables explican casi un tercio de la brecha (-7 % explicado frente a -23 % no explicado). Al aplicar la metodología de Ñopo, la brecha se reduce a -19 %, y los factores explican casi una quinta parte (-4 % explicado frente a -15 % no explicado) [18].

En el Perú, existe un marco normativo que prohíbe la discriminación salarial entre hombres y mujeres, basado en la Ley 30709 y su reglamento. Como señala Blume, esto se traduce en obligaciones concretas para los empleadores, quienes deben implementar

políticas y procedimientos, elaborar un cuadro de categorías y funciones, y comunicarlo efectivamente a los trabajadores. Esto implica que las empresas deben desarrollar proyectos para superar las barreras estructurales que han afectado a las mujeres y a algunos grupos o colectivos [4].

El Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo ha elaborado guías para facilitar la comprensión del tema. Por ejemplo, identifica factores objetivos (educación, experiencia laboral, horas dedicadas, sector de la economía, ocupación o puesto) y subjetivos (patrones estructurales económicos, sociales y otros mecanismos sutiles de discriminación). En cuanto a las acciones recomendadas para las organizaciones, sugieren un proceso con las siguientes fases: (1) identificar puestos de trabajo, (2) determinar el género asociado a los puestos, (3) valorizar los puestos de trabajo, (4) comparar y calcular las brechas, y (5) implementar medidas para eliminar la brecha salarial [11].

En el sector público, Servir es la entidad responsable del sistema administrativo de recursos humanos y se encarga de analizar,

proponer y controlar la correcta ejecución de los lineamientos para la gestión de personas en los organismos públicos. Anualmente, presenta un informe sobre la situación de la mujer en el servicio civil, en el que se revisan diversos aspectos, tales como (1) características (participación, sector, brecha salarial), (2) Hostigamiento sexual, (3) cargos directivos, y (4) conclusiones y referencias. En cuanto a las variables de interés para este estudio, el informe de 2024, con datos de 2022, indica que el sector público general representa el 16,7 % de la PEA asalariada, con una participación femenina del 47,3 %. Además, la brecha salarial general en el sector público mejoró sustancialmente, pasando del

18,3 % en 2017 al 2,0 % en 2022. La tabla 2 muestra las brechas por los distintos niveles del Estado peruano, elaborada con base en los datos del informe de 2024. Se observa que, para 2022, el problema parece haberse superado, persiste únicamente en el nivel de gobierno local, mientras que, con respecto al gobierno nacional, las mujeres incluso ganan más que sus pares hombres. Un dato adicional del informe revela que el nivel de calificación educativa de las mujeres es mayor que el de los hombres en todos los niveles del Estado; en promedio, un 55 % de las mujeres tiene educación universitaria o avanzada concluida, frente al 39 % de los hombres, como se muestra en la tabla 3 [3].

Tabla 2
Brecha salarial del Estado peruano por niveles 2022 vs. 2017

Segmento	2017			2022		
	Mujer	Hombre	Brecha	Mujer	Hombre	Brecha
General sector público	3,018,00	3,571,80	18,3 %	3,542,00	3,612,00	2,0 %
Gobierno local	2,273,20	2,444,20	7,5 %	2,111,00	2,345,00	11,1 %
Gobierno regional	2,204,50	2,352,70	6,7 %	2,967,00	2,984,00	0,6 %
Gobierno nacional	4,308,00	4,691,20	8,9 %	4,540,00	4,482,00	-1,3 %

Fuente: [3].

Tabla 3
Estudios universitarios y universitario avanzado promedio para el periodo 2017-2022

Segmento	Mujer	Hombre	Mujer-hombre
General sector público	55 %	39 %	16 %
Gobierno local	21 %	16 %	5 %
Gobierno regional	59 %	55 %	4 %
Gobierno nacional	56 %	35 %	21 %

Fuente: [3].

El presente trabajo investiga la brecha salarial de género en el Estado peruano. A partir de las cifras macro presentadas previamente, el problema podría parecer inexistente; sin embargo, al analizar por regiones y observar la evolución durante el periodo estudiado, se encontró evidencia de que la brecha persiste. Esto es aún más notable si consideramos que el nivel de instrucción académica de las mujeres es superior al de los hombres, lo que sugiere la presencia del fenómeno conocido como «techo de cristal». Abordar este problema no solo implica el cumplimiento y respeto de un derecho, sino que también tiene un impacto económico. En el sector público, su tratamiento está vinculado a la generación de valor público para los ciudadanos, además de convertir al Estado en un referente para la sociedad peruana.

$$brecha\ salarial\ de\ género = \frac{remuneración_{hombre} - remuneración_{mujer}}{remuneración_{hombre}}$$

Los valores positivos indican una retribución a favor de los hombres, mientras que los valores negativos reflejan que las mujeres tienen una mayor retribución que los hombres. Para determinar las remuneraciones, se consideran los valores brutos, tanto fijos como variables, así como la cuantificación de los pagos en especie. Además, se debe ajustar a jornadas completas o calcular un ratio por hora trabajada para homologar las diferencias de jornada. Dado que se agrupan datos, se utiliza generalmente la media o la mediana como estimador del grupo [14].

B. Participación femenina

Es el porcentaje de mujeres que conforman la cohorte o segmento del estudio salarial. Esta agrupación puede basarse en el puesto de trabajo, nivel jerárquico (auxiliares, analistas, supervisores/jefes, gerentes, directores), área dentro de una organización, organizaciones dentro de conglomerados (como el Estado), o en criterios de geografía política (distrito, provincia, región, países), entre otros.

$$participación\ femenina = \frac{número\ de\ mujeres}{número\ de\ mujeres + número\ de\ hombres}$$

FUNDAMENTOS

Se presentarán los conceptos y las técnicas utilizados en el desarrollo de este trabajo: definiciones sobre la brecha salarial, la discriminación, las normas laborales, y una referencia a las técnicas de ciencia de datos empleadas en el análisis.

A. Brecha salarial de género

La brecha salarial de género mide cuanto más ganan los hombres en comparación con las mujeres por un trabajo equivalente en calidad de dependiente. La fórmula propuesta por la ONU para calcular este indicador es la siguiente:

C. Principio de igual remuneración por trabajo de igual valor

Este principio amplía el criterio de igual paga por igual trabajo, establecido en la normativa peruana a través de la Ley n.º 30709, Ley que prohíbe la discriminación remunerativa entre varones y mujeres (Ley de Igualdad Salarial). Esto significa que no solo se aplica a trabajos iguales o similares, sino también a puestos distintos con un valor comparable. Es decir, se refiere a puestos con diferentes contenidos, responsabilidades, calificaciones y condiciones, pero que generan el mismo o similar valor para la organización [7] [11].

D. Política salarial o remunerativa

Es el conjunto de criterios y directrices que las organizaciones establecen para gestionar las remuneraciones (fijación o reajuste de los diferentes esquemas salariales). En el contexto de la Ley de Igualdad Salarial, estos criterios deben ser justos y evitar la discriminación salarial [7].

E. Valoración de puestos

Es un proceso sistemático que utiliza información interna y externa para determinar el valor relativo que un puesto aporta a la organización, asegurando que la compensación (remuneración) esté alineada con los perfiles del puesto y los criterios generales de evaluación. En el caso peruano, la Ley n.º 30709 y su reglamento recomiendan el uso de un modelo de puntos por factor, ya que descompone los puestos en factores y subfactores para su posterior evaluación. Los factores sugeridos por la Guía de la Ley son los siguientes: (1) calificaciones o competencias, (2) esfuerzos, (3) responsabilidades y (4) condiciones en que se realiza el trabajo. Los subfactores son los elementos que capturan los detalles de los puestos, permitiendo la asignación de puntos para su valoración. Un requisito clave es evitar sesgos, por lo que se recomienda que este proceso lo lleve a cabo un comité, y que la variable género no se utilice para asignar puntos (discriminación). Esto permitirá, a su vez, la creación de la política salarial, la estructura y las bandas salariales. La ley denomina a este proceso Cuadro de categorías y funciones [7] [11].

F. Discriminación remunerativa por género

La discriminación salarial ocurre cuando se establecen diferencias remunerativas basadas en el sexo de la persona sin criterios objetivos. La discriminación puede ser (1) directa, cuando los procedimientos o prácticas excluyen o favorecen a una persona o grupo de personas por motivos prohibidos, como el género; (2) e indirecta, cuando se implementan medidas aparentemente neutrales, pero cuya aplicación afecta de manera desproporcionada a los miembros de un grupo o colectivo protegido, generando un impacto adverso en los trabajadores [7].

G. Plataforma Nacional de Datos Abiertos

Es una plataforma tecnológica donde el Estado peruano, a través de los organismos públicos y los diferentes niveles del gobierno, pone a disposición de la ciudadanía diversas herramientas (*datasets*, páginas, documentos, *dashboards*, etc.) en el marco de las políticas de gobernanza de datos, garantizando la transparencia en la función pública. Las normas del Estado peruano establecen

que las entidades públicas deben implementar, conforme a su contexto legal, tecnológico y estratégico, las herramientas necesarias para la recopilación, procesamiento, publicación, almacenamiento y apertura de los datos que administran [2].

H. Ciencia de datos

Es una práctica interdisciplinaria que integra métodos de ingeniería, estadística, minería de datos, aprendizaje automático y analítica predictiva. Similar a la investigación de operaciones, la ciencia de datos se centra en tomar decisiones basadas en datos y gestionar su implementación, con un enfoque eminentemente práctico [19].

I. Limpieza e imputación de datos

Estas técnicas conforman el análisis previo de datos y tienen como objetivo revisar las características de las variables e identificar patrones de datos perdidos para proponer un esquema de tratamiento. Para los datos faltantes, generalmente se utilizan dos técnicas, que pueden combinarse: la eliminación de los registros incompletos y la imputación de datos, aplicando métodos como la propagación hacia adelante y atrás de la última observación, regresiones, entre otros [1].

J. Regresión lineal simple

Es una técnica de aprendizaje supervisado que asume que la variable independiente X influye en la variable dependiente Y , es decir, $X \rightarrow Y$. Esta relación se expresa mediante una línea recta con la siguiente fórmula:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

En la expresión anterior, β_0 es el coeficiente que representa el parámetro de intercepto poblacional, β_1 es el coeficiente que representa el parámetro de regresión poblacional asociado a la variable predictora X_i , y ε_i es la variable aleatoria no observable, conocida como término aleatorio, que contiene los efectos de otras variables predictoras no incluidas explícitamente en el modelo.

Los supuestos del modelo son (1) la variable Y_i tiene una media y varianza constantes (homocedasticidad), (2) La variable X_i es fija, es decir, no hay error en su medición, y (3) la variable $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, donde el valor constante de σ^2 significa que los valores de Y_i son independientes entre sí y no están correlacionados [15].

K. Estudentización de variables

Es una técnica de preprocesamiento de datos que normaliza las escalas de las variables para evitar sesgos derivados de sus medidas. Se usa con frecuencia antes de aplicar técnicas de *clustering*. Para cada dimensión de un conjunto de datos, se resta la media y se divide el resultado entre la desviación estándar muestral, logrando que la variable estandarizada tenga una media de 0 y una desviación estándar de 1. La fórmula de estandarización de la variable X es la siguiente [1].

$$x_{estandarizada} = \frac{x_i - \bar{x}}{\delta_x}$$

L. Clustering

Es una técnica de *Machine Learning* que pertenece al aprendizaje no supervisado y agrupa observaciones de manera que cada grupo sea homogéneo, es decir, que sus elementos sean similares, mientras que los grupos entre sí sean lo más distintos posible. A diferencia de las técnicas de aprendizaje supervisado, en esta técnica no se conoce de antemano el número de grupos o clústeres, lo que debe ser afinado por el analista. Un aspecto clave es el tipo de distancia a emplear y la necesidad de homogeneizar las variables. Una técnica común para este preprocesamiento es la estandarización de las variables. Entre las técnicas más habituales de *clustering* están los algoritmos aglomerativos (jerárquico) y particionados (k-means, PAM) [1] [10].

M. Medidas de validación de clustering

Dada la gran cantidad de algoritmos de *clustering* disponibles, es necesario contar con criterios que permitan determinar el número adecuado de clústeres. Brock propone tres esquemas: (1) interno, que utiliza la información intrínseca de los datos para evaluar la calidad del *clustering*; entre estos están la conectividad, el ancho de la silueta y el índice de Dunn. (2) Estabilidad, una variante de las medidas internas, que compara los clústeres obtenidos tras remover una columna; entre estos se encuentran la proporción de no superposición (APN), la distancia promedio (AD), la distancia promedio entre medias (ADM) y la cifra de mérito (FOM). (3) Biológico, aplicable a datos biológicos para analizar si los clústeres

tienen significado. Estos tres esquemas son aplicables a varios de los algoritmos aglomerativos y particionados, y su implementación se encuentra en el paquete *clValid* para el R [5].

N. Perfiles de brecha salarial

Consiste en aplicar medidas de estadística descriptiva a las variables de cada conglomerado identificado mediante técnicas de *clustering*. Se utilizó la mediana debido a la asimetría de las variables, ya que es un estadístico más robusto que la media.

METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) como marco de trabajo para el uso de herramientas de ciencia de datos en el abordaje de la brecha salarial de género en el Estado peruano [6]. Para el desarrollo de sus fases, se emplearon los paquetes indicados en la tabla 4. El estudio incluyó la ejecución de varios ciclos de la metodología CRISP-DM, aplicándola a modelos de aprendizaje supervisado mediante regresión lineal para estimar la tendencia de mejoras en las brechas regionales. Posteriormente, se añadieron variables relacionadas con el desempeño de las regiones y los servicios del Estado peruano, con el fin de aplicar técnicas de aprendizaje no supervisado e identificar perfiles de la brecha salarial en las regiones.

Tabla 4
Paquetes de RStudio empleados

Paquete	Utilización
tidyverse	Manipulación de <i>dataframes</i> (<i>datasets</i>), tablas resúmenes y gráficos
readxl	Lectura y manejo de los archivos en formato Excel
janitor	Adecuación de nombres de variables
skimr	Estadísticas generales del dataset, detección de <i>missing values</i> y distribución de variables
clValid	Métricas de comparación para modelos de <i>clustering</i>
dendextend	Gráficos del <i>clustering</i> jerárquico
purrr	Programación funcional, se utilizó para simplificar las regresiones lineales múltiples para los países
coin	Prueba no paramétrica de Mood para las medianas de los clústeres
broom	Obtención y manipulación de los resultados de las regresiones para cada región

Fuente: Elaboración propia.

Fase I, entendiendo el negocio

En este trabajo, se plantean dos objetivos de investigación: (1) identificar la existencia de la brecha salarial de género en el Estado peruano a nivel regional y (2) caracterizar los perfiles de brecha salarial de género presentes a nivel regional. Para el primer objetivo, se aplicarán técnicas de limpieza, imputación de datos y cálculo de las variables necesarias para el análisis (brecha y participación). Para el segundo, se añadirán variables asociadas al desarrollo regional y a los servicios del Estado, como el PBI per cápita de la región y la cobertura de personas por cada servidor público. Con los clústeres identificados, se procederá a caracterizarlos para presentar el perfil de las regiones con la información de 2021 y corroborar la existencia de la brecha salarial por medio de la prueba de hipótesis no paramétrica de diferencia de medianas de Brown-Mood.

Fase II, entendiendo datos

Los datos utilizados para el presente análisis se obtuvieron de las siguientes entidades públicas:

- Plataforma de datos abiertos y del *dataset* publicado por Servir, de aquí se obtuvieron los datos agregados por región, género, personas e ingresos promedios para los años 2017-2021, representa la principal fuente de información [2].
- Información del INEI para obtener población y PBI por regiones para 2021 [8] [9].

Durante la fase de carga y limpieza de datos, se detectó que el conjunto de datos proveniente de Servir omitió información sobre el número de servidores públicos para 2018. Se realizó la imputación utilizando la semisuma de los servidores de 2017 y 2019. Se optó por este método simple para evitar el uso de datos de 2020 o 2021, ya que estos reflejarían el impacto de la reducción de puestos de trabajo debido a la pandemia, como se muestra en la figura 5.

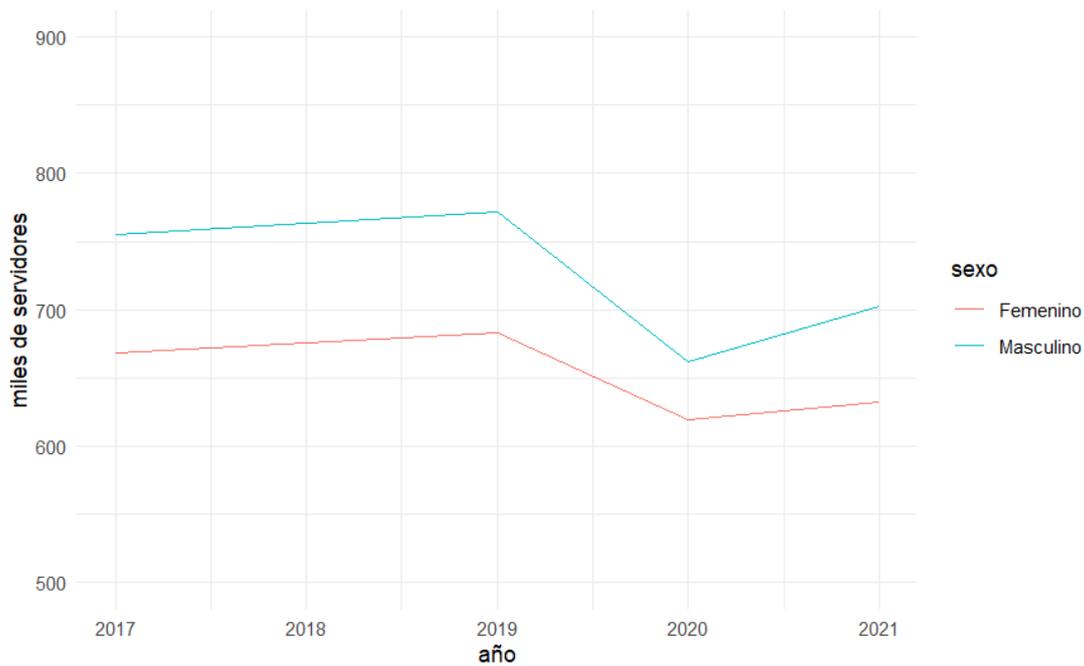


Figura 5. Evolución de los servidores públicos por sexo

Fuente: Elaboración propia.

Concluida la limpieza, la imputación, el reacomodo y la generación de las nuevas características (brecha, participación, nivel de brecha y número de servidores) se tiene disponible el *dataset* de trabajo que permitirá el análisis de los objetivos planteados, las

variables se presentan en la tabla 5. Las variables disponibles para el análisis y modelado, corresponden a agregaciones por año y región.

Tabla 5
Variables disponibles

Variable	Valores únicos	Descripción
region	25	Nombre de las regiones
ubigeo	25	Código de ubigeo de las regiones, se utilizó para unir con data del INEI (PBI, población)
year	5	Año del periodo bajo estudio 2017-2021
Masculino	125	Remuneraciones promedio de hombres consolidado por regiones
Femenino	125	Remuneraciones promedio de mujeres consolidado por regiones
nro_Masculino	125	Número de hombres por región y año que laboran en el Estado peruano
nro_Femenino	125	Número de mujeres por región y año que laboran en el Estado Peruano
brecha_salarial	125	Brecha salarial de mujeres por región y año
servidores	125	Número total de servidores, es la suma de nro_Masculino y nro_Femenino
participacion	125	Participación de las mujeres por región y año
level_brecha	3	Variable ordinal (bajo, medio, alto) que agrupa los valores con base a la muestra de las brechas de regiones y años por terciles

Fuente: Elaboración propia.

a. Fase II, Entendiendo los datos por medio del análisis exploratorio de datos

Los resultados del análisis exploratorio de datos son los siguientes:

- **Nivel agregado de Estado peruano**

Revisamos la evolución de los dos indicadores clave: brecha salarial y participación. Como se aprecia en la figura 6, la

participación ha alcanzado niveles cercanos a la paridad, y la brecha salarial ha ido disminuyendo de forma lenta, pero progresiva hasta antes de la pandemia. Posteriormente, ambos indicadores se deterioraron. La brecha salarial se redujo del 13,0 % en 2017 al 10,10 % en 2020, para luego aumentar al 11,16 % en 2021. De manera similar, la participación mejoró del 46,9 % en 2017 al 48,3 % en 2020, retrocediendo al 47,3 % en 2021.

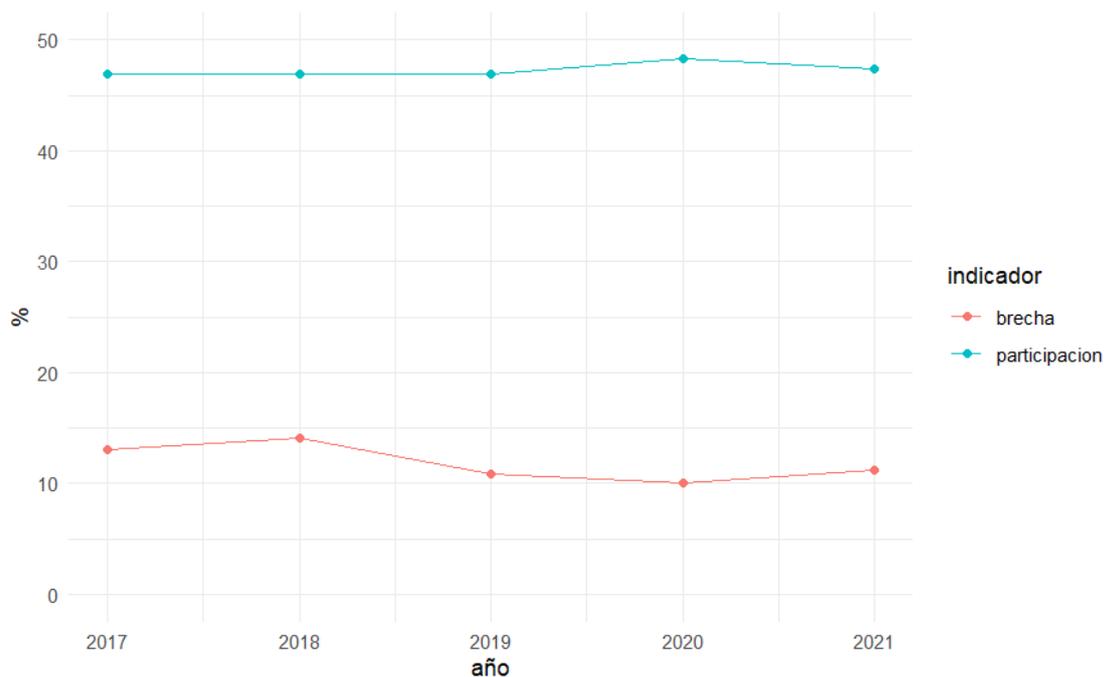


Figura 6. Evolución de brecha salarial y participación a nivel Estado

Fuente: Elaboración propia.

Analizamos la relación entre la brecha salarial y la participación a nivel agregado en el Estado peruano, corroborando la evidencia mencionada en la introducción: a mayor participación, menor es la brecha salarial, como se observa en la figura 7. La revisión a nivel agregado del Estado peruano muestra buenos indicadores, lo que podría sugerir que el problema es casi inexistente.

• **Nivel agregado de región y año**

Al revisar las variables por año y región, y utilizar diagramas de cajas para agrupar los resultados anuales, se observa una gran variabilidad, lo que propone la posible existencia de una brecha oculta al analizar los datos a nivel estatal. La figura 8 muestra la evolución de la variabilidad en la brecha salarial, mientras que la figura 9 presenta la participación por año. Los puntos corresponden a las distintas regiones.

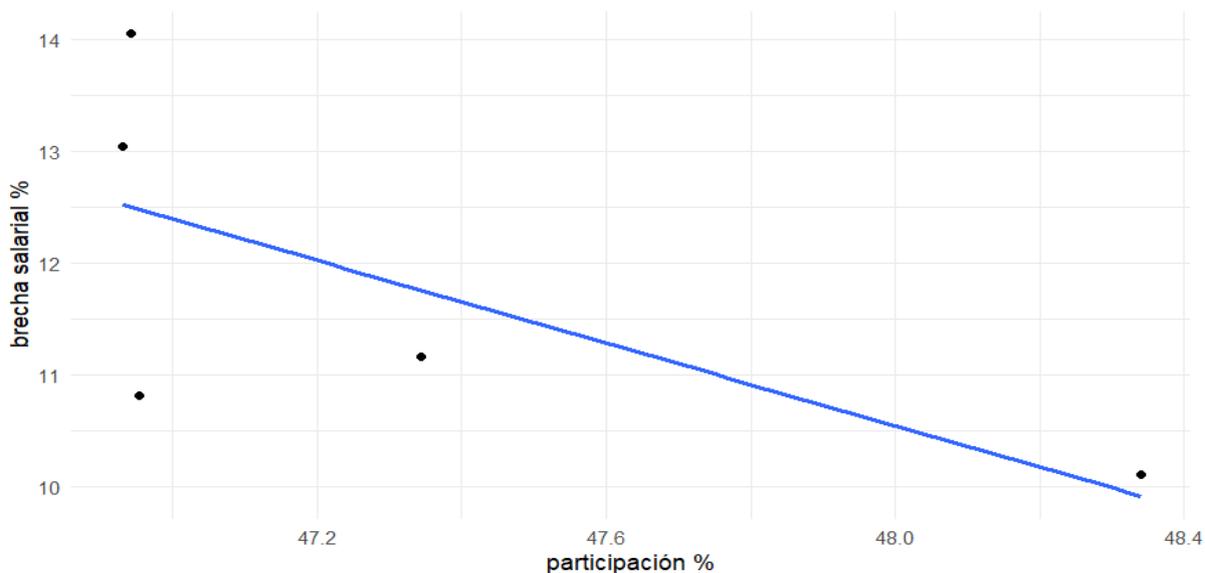


Figura 7. Relación entre brecha salarial y participación a nivel Estado

Fuente: Elaboración propia.

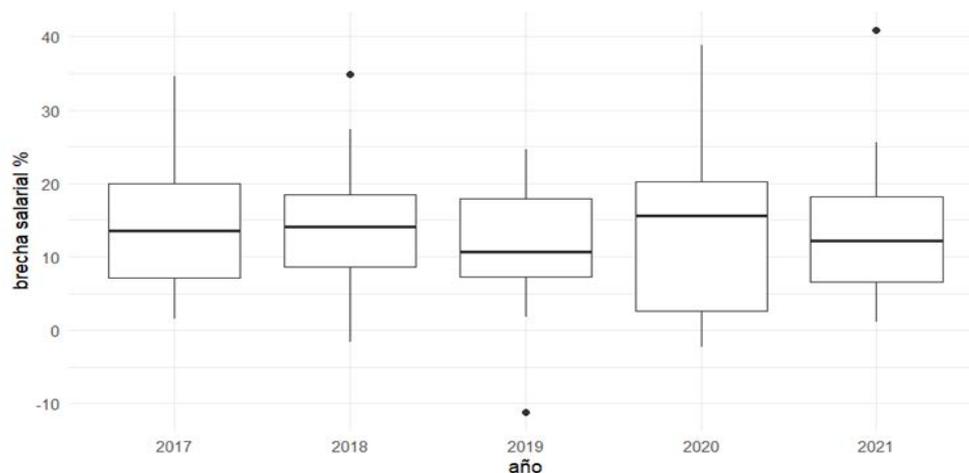


Figura 8. Brecha Salarial por año, la dispersión corresponde a las regiones

Fuente: Elaboración propia.

Al revisar el diagrama de dispersión de la brecha salarial versus la participación para todas las regiones y años, se observa una escasa relación positiva, con una correlación de 0,149, como se muestra en la figura 10. Al segmentar la brecha salarial por terciles usando la variable categórica /evel/ brecha (bajo, medio, alto), no se

aprecia una relación significativa en los niveles bajo y medio, con correlaciones muy bajas de -0,089 y -0,015, respectivamente. Sin embargo, en el nivel alto se observa una ligera relación que contradice la teoría: a mayor participación, mayor es la brecha, con una correlación de 0,319. Esto se aprecia en la figura 11.

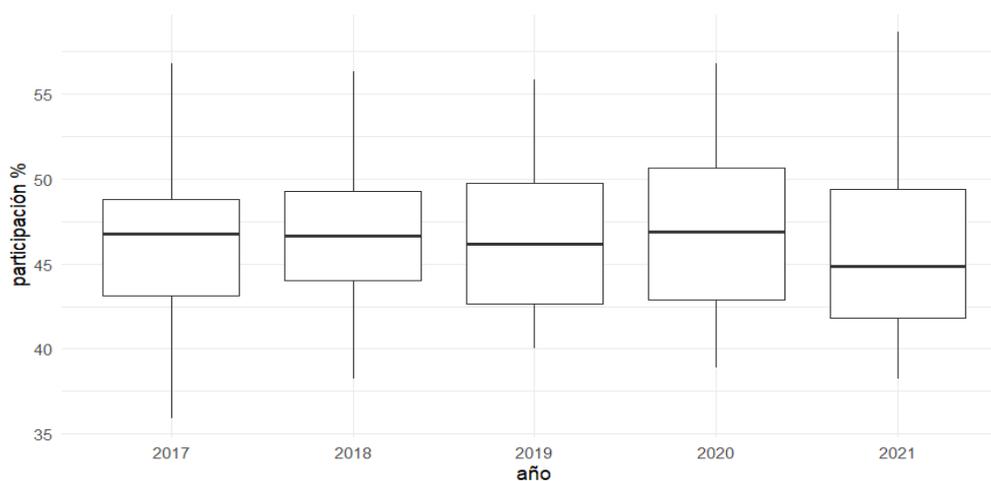
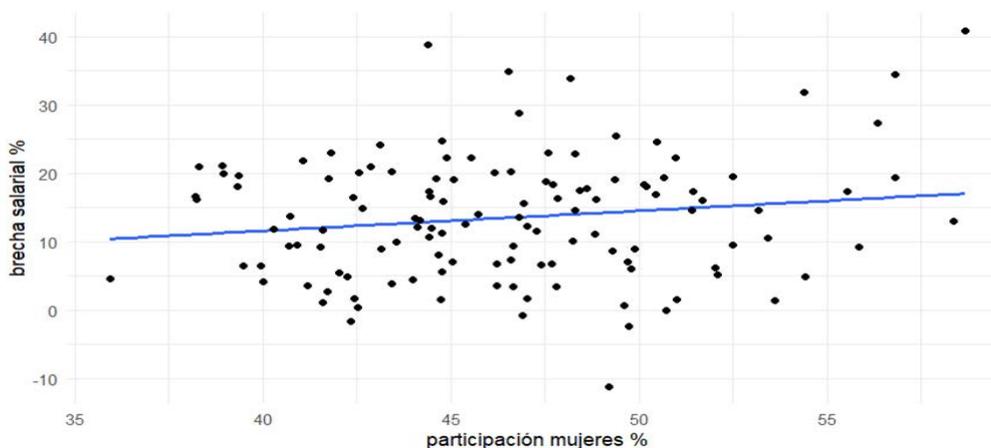


Figura 9. Participación femenina por año, la dispersión corresponde a las regiones

Fuente: Elaboración propia.



elaboración propia

Figura 10. Brecha salarial vs. participación, cada punto representa una región por año.

Fuente: Elaboración propia.

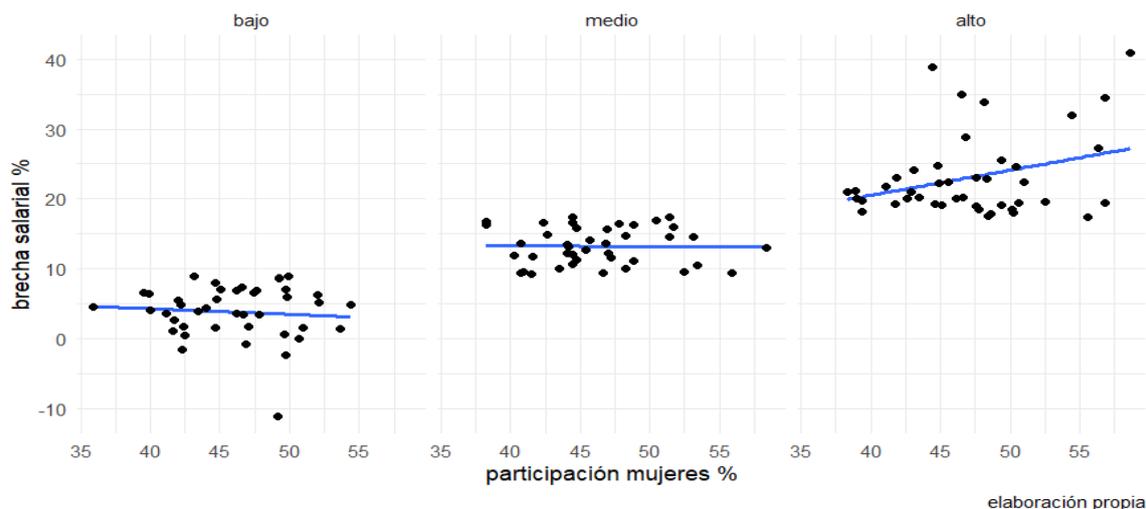


Figura 11. Brecha salarial vs. participación, con base a niveles de brecha por terciles: bajo, medio y alto.

Fuente: Elaboración propia.

• **Revisión de brecha salarial y participación por regiones**

La revisión de la brecha salarial por región muestra una gran dispersión, lo que confirma la existencia del problema al

desagregar los datos a nivel estatal. La figura 12 presenta la mayor brecha salarial mediana en Pasco, con un 26 %, y la menor en Ica, con un 6,3 %. En cuanto a la dispersión, medida por el rango intercuartílico, Apurímac presenta la mayor dispersión, con un 25 %, mientras que Piura tiene la menor, con un 2 %.

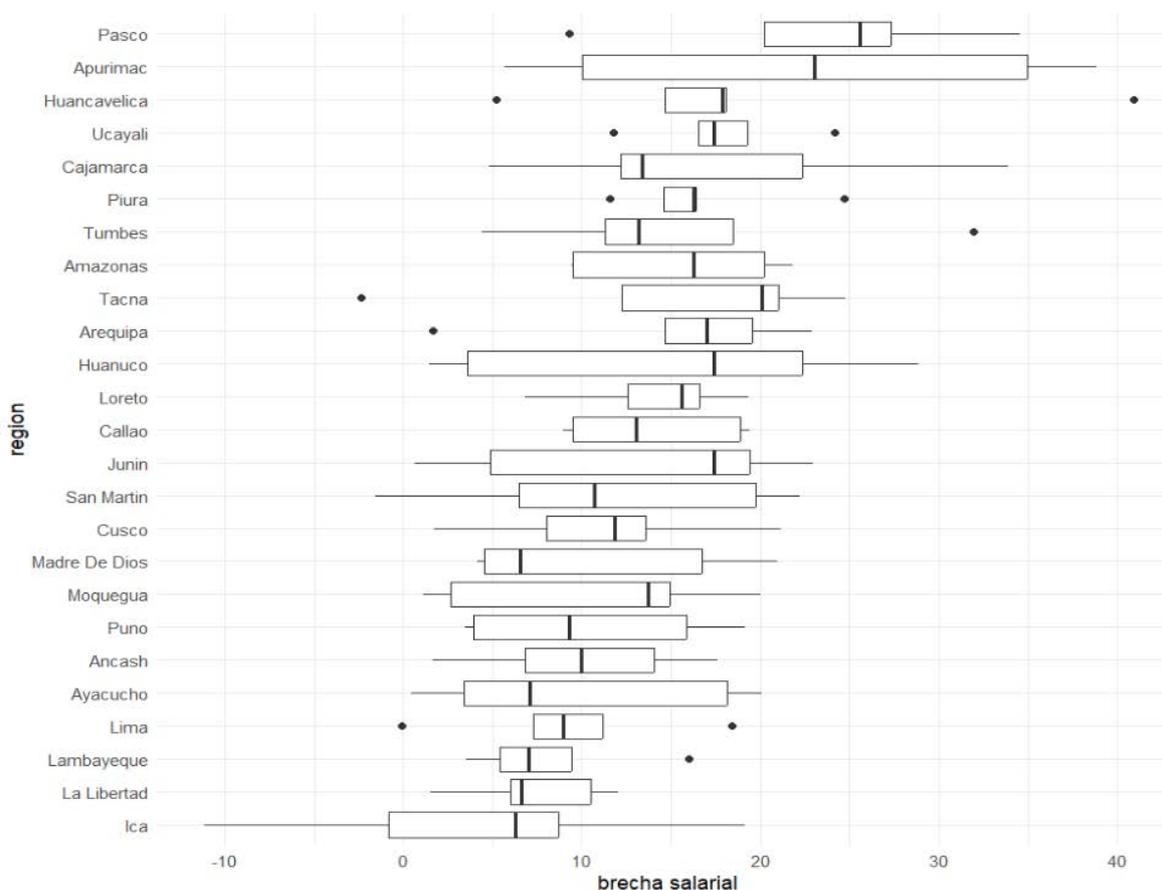


Figura 12. Diagrama de cajas por regiones para la brecha salarial

Fuente: Elaboración propia.

Al revisar la participación por regiones, también se observa una gran variabilidad, como se aprecia en la figura 13. La mayor participación mediana corresponde a Pasco, con un 56 %, mientras que la menor se registra en Madre de Dios, con un 39

%. En cuanto a la variabilidad, medida por el rango intercuartílico, Pasco presenta la mayor, con un 7 %, y la menor corresponde a Ica, con prácticamente un 0 %.

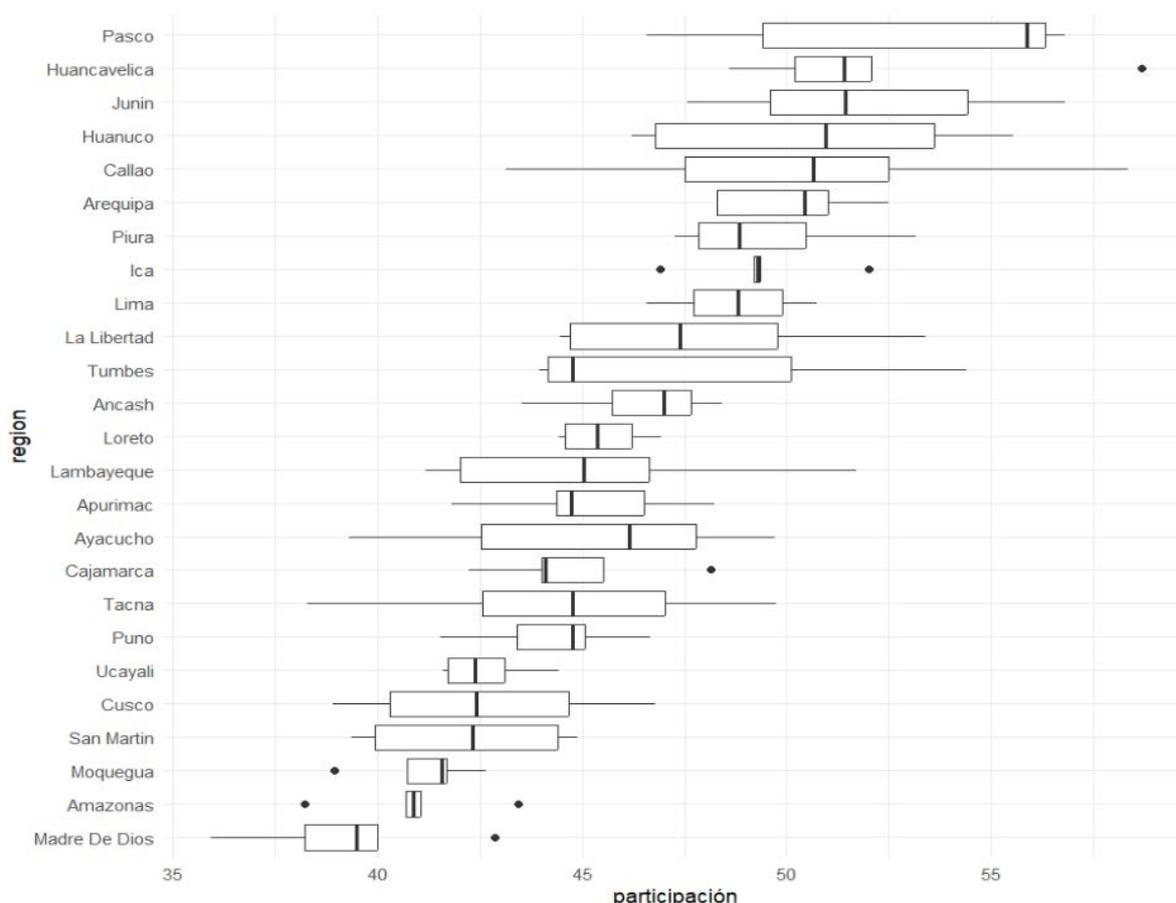


Figura 13. Diagrama de cajas por regiones para la participación femenina

Fuente: Elaboración propia.

C. Fase III, preparación de datos

La metodología CRISP-DM se ha aplicado de manera iterativa para cada uno de los objetivos planteados en este estudio y sus correspondientes modelos. Así tenemos lo siguiente:

- Para el análisis exploratorio de datos, se reorganizó la estructura original en formato tidy, es decir, con observaciones en filas y variables en columnas. Se imputaron los datos faltantes.
- Se definieron las variables necesarias para el análisis: brecha, participación y total de servidores.
- Para determinar el avance o retroceso de las regiones en el problema de la brecha salarial de género, se prepararon los datos para aplicar el modelo de regresión lineal simple. Los coeficientes de las variables y su nivel de significancia respaldaron estos hallazgos.
- Para identificar los perfiles de las regiones, se integraron los datos con la información del INEI y se definieron nuevas variables significativas para el análisis. Luego, se preprocesaron con estandarización para evitar problemas de magnitud en la aplicación de las técnicas de clustering.

- La caracterización de los perfiles requirió transformar los datos para aplicar estadísticas descriptivas sobre las variables originales, vinculadas con la identificación de los clústeres a los que pertenecen las regiones.

D. Fase IV, modelado y Fase V, evaluación

Se emplea el modelo de regresión lineal simple para identificar qué regiones han avanzado o retrocedido en relación con el problema de la brecha salarial de género. Se utilizó un nivel de significancia de 0,10, debido a que en los problemas sociales complejos siempre hay variables que el modelo no captura, dadas las limitaciones del muestreo, los instrumentos disponibles y los modelos teóricos.

Para la determinación de los perfiles, se emplean técnicas de clustering aglomerativo y particionado. La evaluación del número de clústeres se basa en la técnica del codo y se contrasta con análisis más robustos, como los criterios internos y de estabilización.

La caracterización de los perfiles se realiza mediante estadística descriptiva y una revisión gráfica entre ellos, utilizando diagramas

de violín para corroborar la existencia del problema de la brecha salarial a nivel regional.

- **Modelos para identificar los avances y retrocesos de la brecha salarial de género por región**

Se utilizó un modelo de regresión lineal donde la variable dependiente era la brecha salarial y la independiente, el año. Los

resultados se presentan en la tabla 6. Esta tabla muestra modelos significativos para seis regiones, en las que se encontraron coeficientes $\hat{\beta}$ significativos. Tres regiones lograron avances en la reducción de la brecha: Huánuco, Moquegua y Áncash, mientras que tres retrocedieron: La Libertad, San Martín y Huancavelica. Para las otras 19 regiones, no se encontraron evidencias estadísticas de mejora o deterioro.

Tabla 6
Resultado de las regresiones por región, se ordena por modelo significativo y ascendentemente por $\hat{\beta}$

Modelo significativo	β significativo	Región	R ²	pvalue modelo	$\hat{\beta}$	$\hat{\beta}$ std.error	$\hat{\beta}$ statistic	$\hat{\beta}$ pvalue
sí	sí	Huánuco	0,902	0,013	-7,142	1,355	-5,270	0,013
sí	sí	Moquegua	0,884	0,017	-4,874	1,019	-4,784	0,017
sí	sí	Áncash	0,748	0,058	-3,383	1,133	-2,986	0,058
sí	sí	La Libertad	0,909	0,012	2,483	0,454	5,470	0,012
sí	sí	San Martín	0,735	0,063	5,284	1,830	2,887	0,063
sí	sí	Huancavelica	0,669	0,091	6,793	2,760	2,461	0,091
no	no	Tumbes	0,627	0,110	-5,154	2,294	-2,247	0,110
no	no	Ica	0,245	0,396	-3,530	3,575	-0,987	0,396
no	no	Pasco	0,179	0,478	-2,511	3,106	-0,808	0,478
no	no	Lima	0,295	0,344	-2,295	2,047	-1,121	0,344
no	no	Lambayeque	0,520	0,169	-2,199	1,219	-1,804	0,169
no	no	Arequipa	0,154	0,514	-2,021	2,737	-0,738	0,514
no	no	Junín	0,079	0,646	-1,733	3,406	-0,509	0,646
no	no	Ucayali	0,144	0,529	-1,077	1,517	-0,710	0,529
no	no	Tacna	0,020	0,823	-0,956	3,906	-0,245	0,823
no	no	Amazonas	0,000	0,985	-0,044	2,127	-0,021	0,985
no	no	Puno	0,000	0,991	0,033	2,563	0,013	0,991
no	no	Piura	0,068	0,671	0,805	1,717	0,469	0,671
no	no	Madre de Dios	0,028	0,788	0,819	2,787	0,294	0,788
no	no	Loreto	0,078	0,648	0,844	1,671	0,505	0,648
no	no	Callao	0,077	0,652	0,875	1,753	0,499	0,652
no	no	Cusco	0,046	0,730	0,969	2,555	0,379	0,730
no	no	Ayacucho	0,118	0,572	1,913	3,027	0,632	0,572
no	no	Cajamarca	0,248	0,393	3,517	3,534	0,995	0,393
no	no	Apurímac	0,174	0,485	3,868	4,866	0,795	0,485

Fuente: Elaboración propia.

La figura 14 muestra la evolución de las tres regiones con mejores avances, en tanto que la figura 15 muestra las regiones con mayores retrocesos.

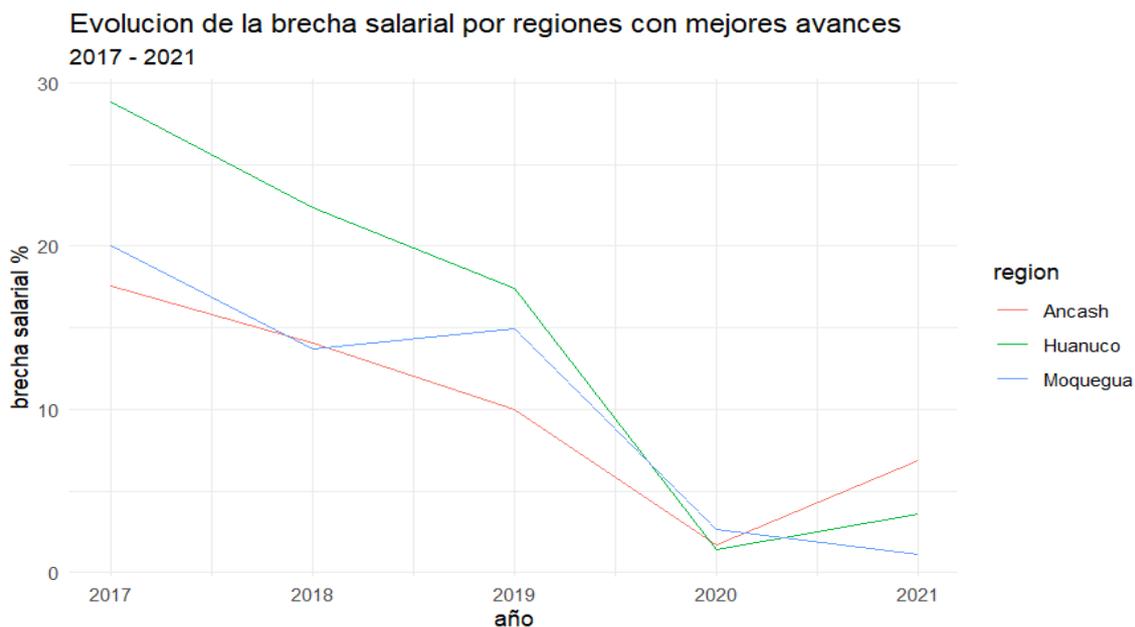


Figura 14. Regiones con los mejores avances en la reducción de la brecha salarial de género

Fuente: Elaboración propia.

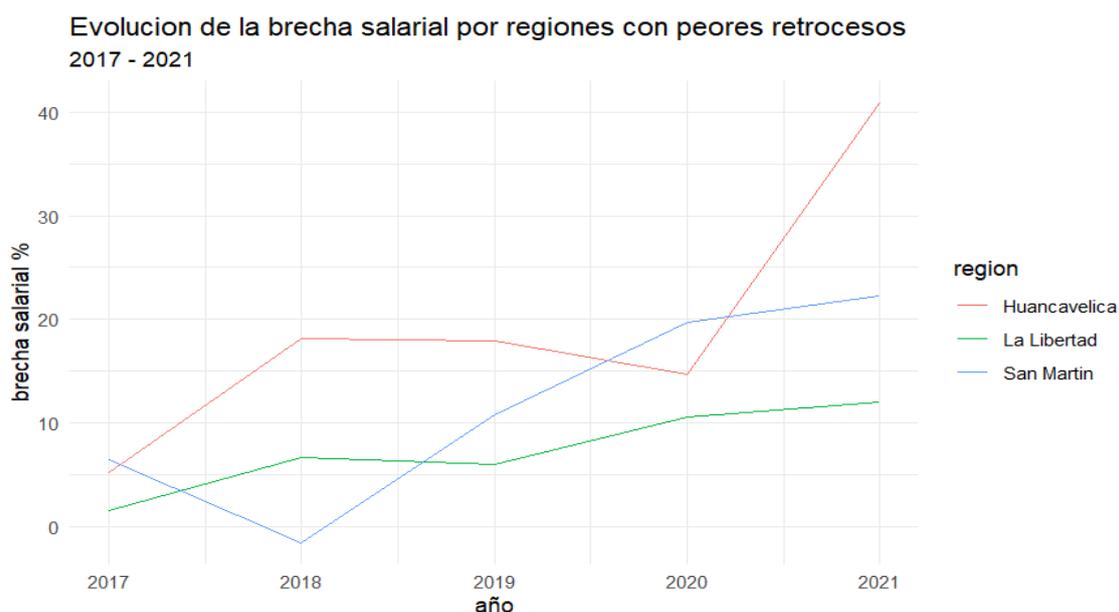


Figura 15. Regiones con los retrocesos más significativos de brecha salarial de género

Fuente: Elaboración propia.

- **Modelos de clustering para la determinación de los perfiles de región por brecha salarial**

Para este análisis, se consideró el último año del conjunto de datos proporcionado por Servir (2021), al cual se añadieron indicadores del INEI, como población y PBI de la región. A partir de estos, se generaron variables como el PBI per cápita (para el modelo se utilizó el logaritmo de este indicador) y la cobertura de cada servidor público.

Se realizaron varias iteraciones para determinar el número adecuado de clústeres. De acuerdo con el método del codo,

se recomendarían 4 clústeres, como se muestra en la figura 16. Adicionalmente, se probó con 2, 3 y 4 clústeres utilizando los algoritmos *k-means* y jerárquico. Debido a que el número de regiones es reducido, los valores más balanceados por número de regiones se obtenían con 2 y 4 clústeres. La evaluación mediante criterios internos y de estabilidad recomendó mayoritariamente dos clústeres, como se observa en la tabla 7 y ese fue el número de clústeres que se utilizó para el agrupamiento de las observaciones (regiones) por el método jerárquico. La agrupación de las regiones se presenta en la figura 17.

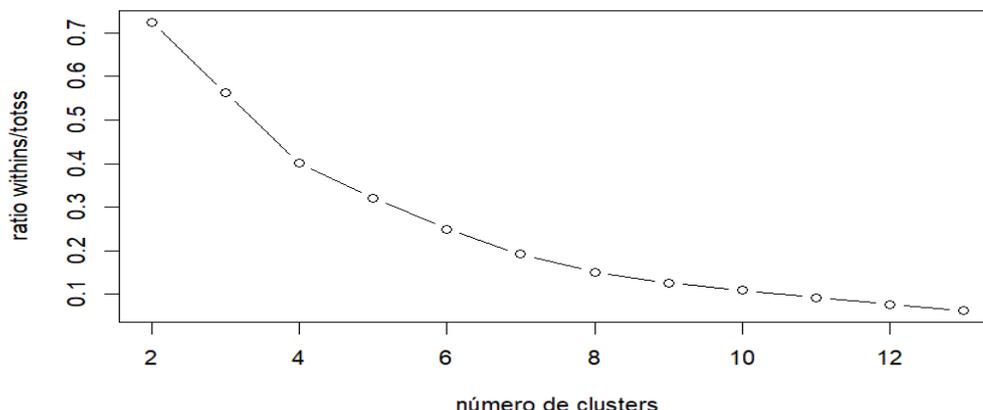


Figura 16. Método del codo para la determinación del número de clústeres

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7
Número de clústeres sugeridos por la validación interna y de estabilidad

Validación	Indicador	Score	Método	Número de clústeres
Interna	Connectivity	2,929	hierarchical	2
	Dunn	0,6774	hierarchical	12
	Silhouette	0,4192	kmeans	2
Estabilidad	APN	0,0383	kmeans	2
	AD	0,7795	pam	13
	ADM	0,2693	kmeans	2
	FOM	0,794	pam	11

Fuente: Elaboración propia.

En relación con la revisión del problema de la brecha salarial en los dos clústeres identificados, un diagrama de violín que muestra la mediana de ambas caracterizaciones evidencia que las distribuciones y los valores medianos (12,7 para el clúster 1 y 8,9 para el clúster 2) son claramente distintos, lo que confirma la presencia del problema de brecha salarial, como se aprecia en la figura 18. Se utilizó la prueba no paramétrica de Brown-Mood para comparar las medianas de los 2 clústeres. Con un nivel de significación de 0,05, se concluye que las medianas son diferentes, como se detalla en la tabla 8.

La categorización de los clústeres utilizando la mediana, dada la asimetría de los clústeres identificados, se presenta en la tabla 9. Se observa claramente la diferencia entre los dos clústeres: en el clúster 1, la brecha salarial es mayor, la participación es menor y el PBI per cápita de la región es más bajo. En el clúster 2, los indicadores son más favorables: la brecha salarial se reduce al 8,9 %, la participación es casi paritaria y el PBI per cápita es más del doble que en el clúster 1. Ambos clústeres comparten similar presencia promedio de servidores públicos por persona en sus respectivas regiones.

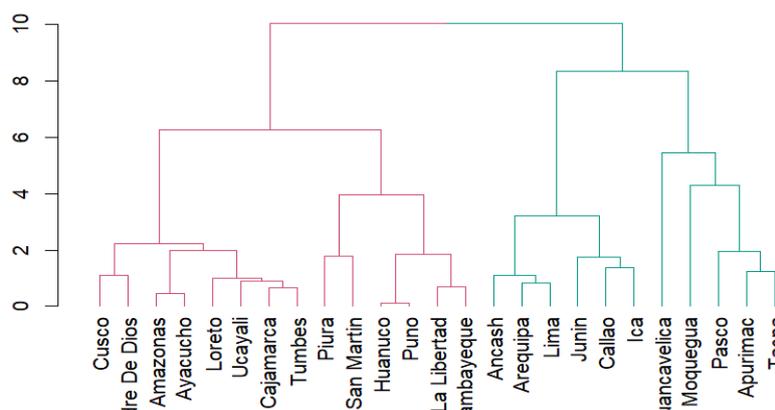


Figura 17. Regiones agrupadas en dos clústeres para analizar la brecha salarial de género

Fuente: Elaboración propia.

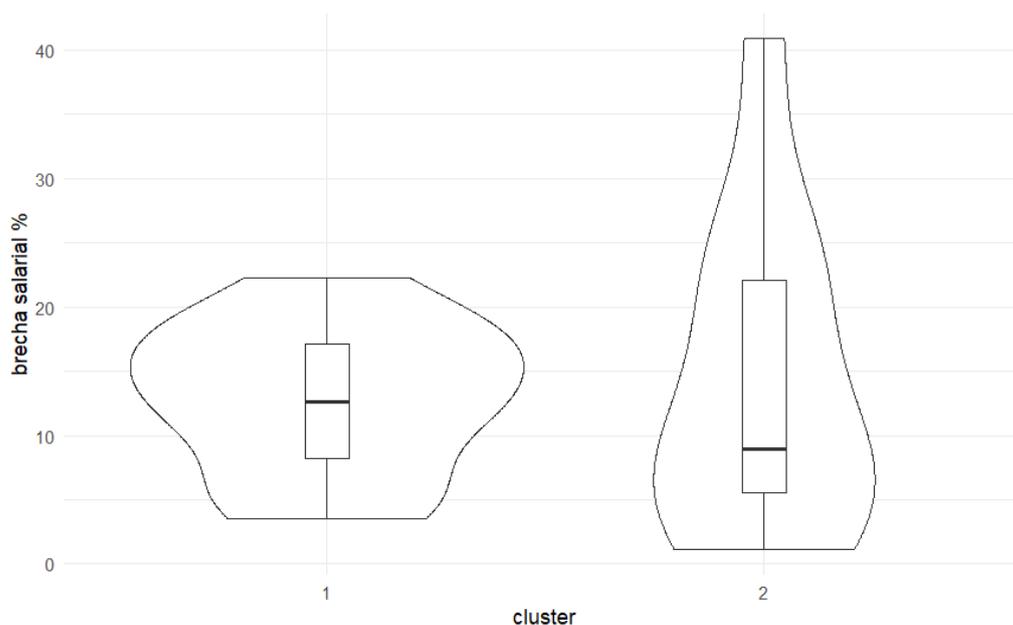


Figura 18. Diagrama de violín, se aprecia diferentes distribuciones y valores medianos para los 2 clústeres identificados

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Prueba de hipótesis no paramétrica para medianas de los clústeres

Test de medianas Brown-Mood	
Estadístico Z = 2,1669	
p-value = 0,03025	
H0: las medianas de las brechas salarial de los clústeres 1 y 2 son iguales	
H1: las medianas de las brechas salariales de los clústeres 1 y 2 son distintas	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9
Caracterización de los clústeres identificados

Clúster	n.º de regiones	Brecha mediana	Participación mediana	PBI per cápita en miles de soles	Cobertura servidor	Regiones
1	14	12,67	44,45	8,62	21,41	Amazonas, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huánuco, La Libertad, Lambayeque, Loreto, Madre de Dios, Piura, Puno, San Martín, Tumbes, Ucayali
2	11	8,93	49,88	19,46	20,98	Áncash, Apurímac, Arequipa, Callao, Huancavelica, Ica, Junín, Lima, Moquegua, Pasco, Tacna

Fuente: Elaboración propia.

E. Fase VI, despliegue

La metodología CRISP-DM plantea seis fases, siendo la última el despliegue del modelo en un ambiente de producción. Esta fase no se desarrolla en este artículo debido a que se trata de una investigación. Sin embargo, los elementos aquí desarrollados podrían ser utilizados, en coordinación con Servir, el INEI y otras entidades públicas, para crear un *dashboard* que permita monitorear y revisar el avance de este problema social en el Estado peruano en todos sus niveles. Esta fase en sí misma constituiría un proyecto cuyo alcance excede el presente estudio.

RESULTADOS

Del análisis exploratorio de datos se observó que, a nivel estatal, los indicadores muestran mejores niveles que los promedios generales de las regiones, con una tendencia a mejorar que fue revertida por la pandemia en 2020. Sin embargo, al revisar los datos a nivel regional, se evidencia un marcado contraste. La dispersión de las variables clave, como la brecha salarial y la participación femenina, pone de manifiesto que el problema se presenta principalmente a nivel regional, según la información proporcionada por Servir. Cabe destacar que, a nivel estatal,

parece existir una relación en la que mayor participación corresponde a una menor brecha salarial. No obstante, al analizar los datos por regiones, esta relación desaparece, e incluso, en el segmento con mayor brecha salarial, se observa que a mayor participación correspondería una mayor brecha, lo que requiere una profundización del análisis con más variables.

Los modelos de regresión lineal simple mostraron que, de las 25 regiones, con un nivel de significancia del 5 %, tres avanzaron (Áncash, Huánuco y Moquegua), tres retrocedieron (Huancavelica, La Libertad y San Martín) y 19 no presentaron cambios significativos.

El análisis de *clustering* fue útil para identificar y caracterizar la naturaleza de este problema social. Se probaron varias alternativas, y finalmente se optó por definir 2 clústeres. La caracterización de estos muestra que el grupo con mejores resultados en cuanto a la brecha salarial (clúster 2, con un 9 %) presenta una participación casi paritaria, mayores ingresos per cápita (más del doble que el clúster 1) y ambos coinciden en la cobertura de servicio por trabajador del Estado, con un promedio de 21 personas por cada servidor público. El diagrama de violín y la prueba de hipótesis aplicados a los clústeres y la brecha salarial demuestran claramente que los grupos tienen una naturaleza distinta, lo que evidencia el problema a nivel regional.

CONCLUSIONES

- A nivel agregado del Estado peruano, se observaron avances en la reducción de la brecha salarial, aunque hubo un retroceso tras la pandemia. Durante el período estudiado, la brecha mejoró del 13 % en 2017 al 11,2 % en 2021, mientras que la participación femenina aumentó ligeramente del 46,9 % en 2017 al 47,3 % en 2021. La relación entre brecha salarial y participación también mostró que, a mayor participación, correspondía una menor brecha. Comparado con la brecha general en América Latina, que era del 14 % en 2019, podría considerarse que el problema en el Perú está mejorando.
- A nivel regional, la realidad era diferente: la brecha salarial y la participación mostraron valores muy diversos y alejados del promedio general a nivel estatal. Pasco presentó el mayor nivel de participación mediana (56 %), mientras que Madre de Dios tuvo el menor (39 %). En cuanto a la brecha salarial mediana, Pasco registró la mayor (26 %) e Ica la menor (6 %), lo que evidencia la presencia de este problema social. Al analizar la relación entre brecha y participación por terciles de brecha (bajo, medio, alto), los diagramas de dispersión mostraron que en los dos primeros niveles no había relación, mientras que en el nivel alto se encontró un ligero indicio contrario al observado a nivel estatal: a mayor participación, mayor brecha.
- De las 25 regiones, y con base en el modelo de regresión lineal simple, se detectaron tres con avances (Áncash, Huánuco y Moquegua), tres con retrocesos (Huancavelica, La Libertad y San Martín), y 19 sin cambios significativos. Esto muestra que existe espacio para implementar políticas públicas orientadas a reducir las brechas salariales, identificar las buenas prácticas de gobernanza que han funcionado en las regiones con avances y evitar las prácticas que están perjudicando a las regiones en retroceso.

- La caracterización de los perfiles de brechas salariales a nivel regional resultó muy útil al incorporar variables económicas y de servicio para complementar las dos variables clave del estudio (brecha y participación). El clúster 1 presenta un valor mediano de brecha del 12,7 %, mientras que el clúster 2 muestra un 8,9 %. Además, el clúster 2 presenta una participación casi paritaria (49,9 %) y un PBI per cápita más del doble que el clúster 1 (19 400 vs. 8600). Ambos clústeres tienen en común una cobertura de casi 21 personas por cada servidor civil. El clúster 2 comprende 11 regiones, pero concentra las que tienen mayor número de servidores (56 %). Este peso, junto con sus mejores indicadores, permite que a nivel agregado el Estado presente una aparente adecuada gestión del problema.
- La prueba de hipótesis no paramétrica de Brown-Mood de los valores medianos de las brechas salariales para los dos clústeres muestran evidencia estadística de la existencia del problema a nivel de regiones.
- La revisión de los grados universitarios y avanzados completos de las mujeres en cada uno de los niveles del Estado peruano (nacional, regional y local) muestra que es superior al de los hombres (55 % de mujeres frente a 39 % de hombres). Esto, en atención a las normas laborales vigentes y a lo encontrado en este estudio, ofrece más evidencia de que el problema de la brecha salarial está presente en el Estado peruano.
- Contar con más información (categorías de puesto, niveles educativos, experiencia, edad, etc.) y con un mayor nivel de granularidad permitiría mejorar el análisis a nivel de provincias, distritos, sectores e incluso organismos públicos. Poner esta información a disposición mediante plataformas en la nube y *dashboards* facilitaría a los implementadores de políticas públicas, en todos los niveles del Estado, monitorear el problema y tomar acciones para reducir la brecha salarial de género.
- Es fundamental contar con un marco metodológico que guíe tanto las revisiones del proyecto general como las revisiones internas de cada modelo, permitiendo su integración. En ese sentido, la metodología CRISP-DM fue un buen soporte para este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Aldas, J. & Uriel, E. (2017). *Análisis multivariante aplicado con R*. Paraninfo.
- [2] Autoridad Nacional del Servicio Civil (Servir). (30 de agosto de 2023). *Plataforma de datos abiertos: Información sobre la cantidad de servidores civiles y sus ingresos promedio a nivel nacional periodo 2017-2021*. <https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/informaci%C3%B3n-sobre-la-cantidad-de-servidores-civiles-y-sus-ingresos-promedio-nivel-nacional>
- [3] Autoridad Nacional del Servicio Civil (Servir) (2024). *La mujer en el servicio civil peruano 2024*. Autoridad Nacional del Servicio Civil (Servir).

- [4] Blume, I. (2023). Igualdad Salarial: Desarrollos actuales, perspectivas y debates. *Laborem* (27), 105-120.
- [5] Brock, G., Datta, S., Pihur, V. & Datta, S. (2008). cValid: An R Package for Cluster Validation. *Journal of Statistical Software*.
- [6] Chapman, P. C. (2000). *CRISP-DM 1.0*.
- [7] Congreso de la República. (15 de marzo de 2024). *Archivo Digital de la Legislación del Perú*. https://www.leyes.congreso.gob.pe/Documentos/2016_2021/ADLP/Normas_Legales/30709-LEY.pdf
- [8] Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (15 de marzo de 2024). *Proyección población 2018-2022*. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones/3464927-peru-proyecciones-de-poblacion-total-segun-departamento-provincia-y-districto-2018-2022>
- [9] Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2024, marzo 31). *PBI por región*. <https://m.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/producto-bruto-interno-por-departamentos-9089/>
- [10] Kassambara, A. (2017). *Practical Guide to Cluster Analysis in R*. STHDA.
- [11] Loayza Pacheco, L. (2019). *Guía para igualdad. Igualdad salarial*. Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo.
- [12] Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2020). *Panorama Laboral 2020. América Latina y el Caribe*. OIT.
- [13] Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2024). *Panorama Laboral en América Latina y el Caribe 2024. Cerrar la brecha de género para impulsar la economía y la productividad en América Latina*. OIT.
- [14] ONU Mujeres. (2023). *¿Qué es la brecha salarial?* <https://lac.unwomen.org/es/que-hacemos/empoderamiento-economico/epic/que-es-la-brecha-salarial>
- [15] Soto, I. & Gamboa, J. (2021). *Ciencia de Datos con R. Métodos estadísticos para la investigación experimental*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- [16] The Royal Swedish Academy of Sciences. (15 de marzo de 2024a). *Scientific background to the Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel 2023*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/advanced-economicsciencesprize2023.pdf>
- [17] The Royal Swedish Academy of Sciences. (15 de marzo de 2024b). *History helps us understand gender differences in the labour market*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/popular-economicsciencesprize2023.pdf>
- [18] Urquidi, M. (2023). *Brecha de ingresos laborales por género en América Latina y el Caribe: un análisis de componentes*. BID.
- [19] Zumel, N. & Mount, J. (2020). *Practical data science with R*. Manning Publications.

ACERCA DEL AUTOR

ROBERTO LEÓN LEYVA

Profesor de la carrera de Big Data y Ciencia de datos de Tecsup, ingeniero de sistemas por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y MBA por la Universidad del Pacífico. Cuenta con estudios concluidos en la maestría de Estadística Aplicada por la Universidad Agraria La Molina (Unalm) y especializaciones por la Universidad de Michigan en Coursera: Data Analytics in the Public Sector with R y Applied Data Science with Python, así como de Datacamp: Data Scientist y Quantitative Analyst with R.

@ robertoleon10@gmail.com

@ www.linkedin.com/in/robertoleonleyva

Recibido: 21-04-24
 Revisado: 16-08-24
 Aceptado: 23-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



Tecsup

VIRTUAL

Domina las herramientas tecnológicas más avanzadas desde cualquier lugar

APRENDE 100% ONLINE a tu manera

Cursos Cortos | Programas Integrales



984 879 904

www.tecsupvirtual.edu.pe

Doble certificación
en cursos y programas seleccionados



CLASES EN VIVO 100% DIGITAL



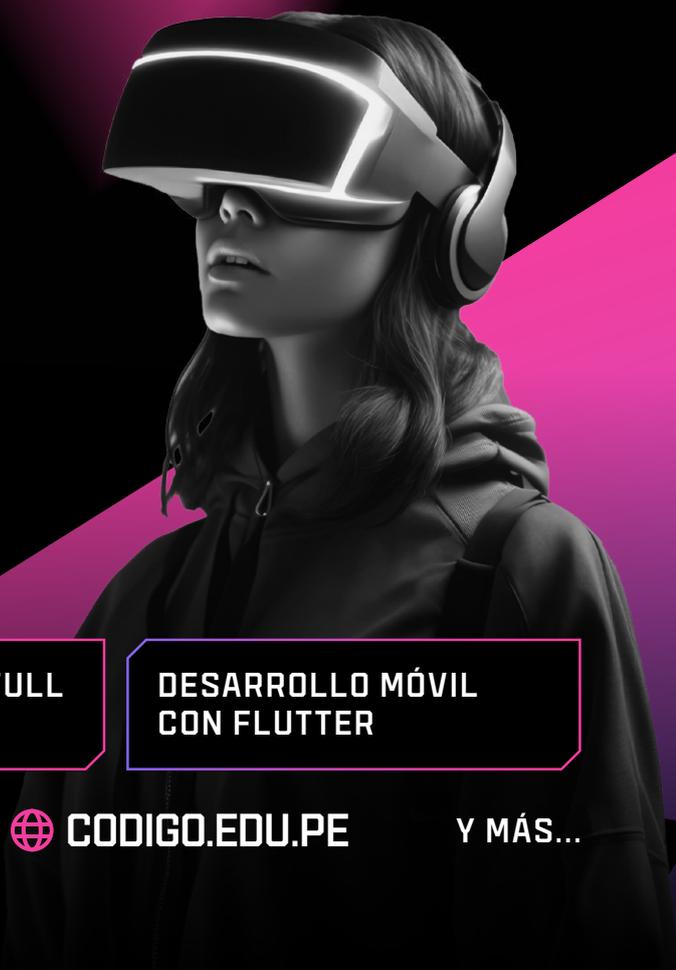
DESPIERTA AL CREADOR QUE LLEVAS DENTRO

MODALIDAD BOOTCAMP (INTENSIVO)

DESARROLLO WEB FULL
STACK CON JAVA

DESARROLLO WEB FULL
STACK CON PYTHON

DESARROLLO MÓVIL
CON FLUTTER



988 639 829 / 984 886 366

CODIGO.EDU.PE

Y MÁS...

Análisis comparativo entre el cálculo
**en base a los estándares
IEC 60287 e IEC 60853.**
El modelamiento y
simulación en el software
Cymcap.



Estudio de cargabilidad de cables subterráneos en redes eléctricas de media tensión y propuesta para incrementar la ampacidad

Study on Ampacity of Underground Cables in Medium Voltage Electrical Networks and Proposal for Enhancement

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de los factores que determinan la cargabilidad de los cables subterráneos en redes de media tensión, las consideraciones y los resultados del cálculo de la capacidad, realizando un análisis comparativo entre el cálculo en base a los estándares IEC 60287 e IEC 60853 y el modelamiento y simulación en el software Cymcap.

Como aplicación se toman los tipos de cables, las condiciones de cargabilidad y las capacidades normadas de una empresa de distribución eléctrica del Perú, explicando los resultados y proponiendo la modificación de la forma de instalación de los cables unipolares para incrementar la capacidad de transmisión.

ABSTRACT

This article presents an analysis of the factors influencing the load capacity of underground cables in medium voltage networks. It discusses the considerations and results of capacity calculations, comparing the IEC 287 and IEC 853 standards with modeling and simulation using Cymcap software.

The study considers the types of cables, load conditions, and the rated capacities of an electricity distribution company in Peru, explaining the results and proposing a modification to the installation method of single-core cables to increase transmission capacity.



Palabras Claves

Ampacidad, cables de media tensión, redes subterráneas.

Key words

Ampacity, medium voltage cables, underground networks.

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de media tensión están compuestas por alimentadores, que pueden ser cables o conductores. Estos cables pueden ser aéreos o subterráneos. En este artículo se analiza los factores que determinan la cargabilidad de los cables subterráneos, entre los cuales destacan: la profundidad de instalación, la resistividad térmica del terreno, la temperatura ambiente, la temperatura nominal de operación del conductor y el factor de carga.

La mayoría de las empresas de distribución eléctrica dispone de información sobre el amperaje que circula por los alimentadores. Estos valores se comparan con las capacidades normadas para evaluar el factor de utilización de las redes y la sobrecarga. Sin embargo, las capacidades normadas se basan en las condiciones más críticas de funcionamiento de la red. Por ello, es necesario evaluar la cargabilidad de los cables, dado su impacto en el diseño, mantenimiento y asignación de cargas en los alimentadores. Definir adecuadamente las capacidades de los cables contribuye al aprovechamiento óptimo de las instalaciones existentes y a la correcta planificación de las inversiones.

En este artículo se analizan los tipos de cables y las condiciones de cargabilidad de una empresa de distribución. Los tipos de cables estudiados son los NKY y N2XSY. Los NKY son cables tripolares con aislamiento de papel impregnado en aceite, instalados en un nivel de tensión de 10 kV. Los N2XSY son cables unipolares con aislamiento XLPE, instalados en tensiones de 10 kV y 22,9 kV.

Las capacidades se calculan según los estándares IEC 287 «Cálculo de la intensidad admisible» [7] e IEC 853 «Cálculo de las capacidades de transporte de los cables para regímenes de carga cíclicos y sobrecargas de emergencia» [8].

En [3] se destaca que los cálculos de la IEC consideran la resistencia interna como constante y no contemplan el efecto del incremento de corriente en la resistencia térmica de las capas del conductor. En [18] se propone un método basado en elementos finitos que ofrece resultados más precisos sobre la evolución térmica al aumentar el amperaje en el cable. En [15] se analiza la influencia de la cubierta metálica en la ampacidad de los cables de potencia. En [9] se ofrece una visión integral sobre cómo factores externos al conductor afectan su ampacidad, incluyendo mediciones de laboratorio sobre la resistividad térmica del terreno. En [16] se aborda el impacto de la conductividad térmica del terreno en los cálculos de ampacidad, proponiendo modificar las características del *backfill* para mejorar la conductividad térmica y sugiriendo un análisis costo-beneficio. En [4] se estudia el impacto de conductores de baja tensión enterrados a menor profundidad y se evalúa el paralelismo de instalaciones, invitando a considerar distintos escenarios de instalación de cables de potencia. En [10] y [6] se destacan las ventajas de emplear el método de elementos finitos para los cálculos de ampacidad. En [2] se comparan diversos métodos de cálculo de ampacidad.

Por ello, las capacidades de los cables se calculan mediante modelado y simulación en el software Cymcap, que emplea elementos finitos para mejorar la precisión. Luego se realiza un análisis comparativo de los cálculos obtenidos y se explican los resultados. Se propone modificar la forma de instalación de los cables unipolares para aumentar su capacidad.

FUNDAMENTOS

Diversos factores determinan la cargabilidad de los cables, que se pueden agrupar en las características del terreno, del cable, de la instalación y de la demanda.

A. Características del terreno

El terreno juega un papel preponderante para el cálculo de la capacidad de los cables, es el medio donde los cables se encontrarán inmersos.

a. Resistividad térmica

La resistividad térmica es un indicador de la oposición a la propagación del calor y se calcula mediante la siguiente expresión [8]:

$$\frac{10^{-3}}{\delta \cdot d(0,82 + 0,042\eta)} K.m/W \quad (1)$$

δ : Difusividad térmica (m^2/s)

d : Masa volumétrica en seco (kg/m^3)

η : contenido de humedad de la masa seca (%)

La figura 1 muestra la relación entre la difusividad y la resistividad térmica del terreno para valores de humedad y masa volumétrica estándar.

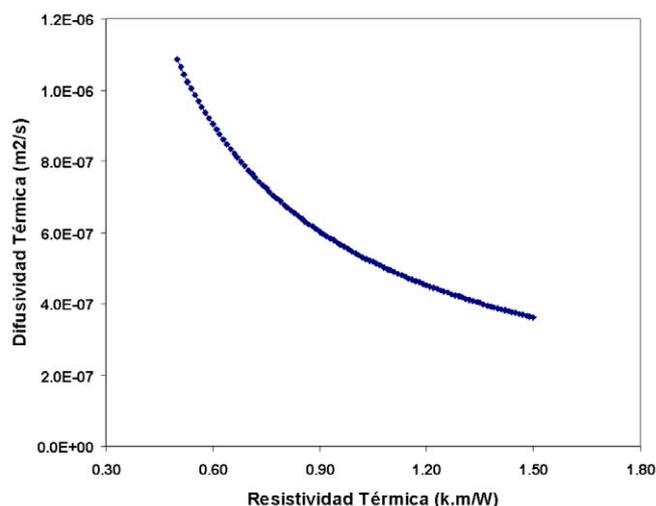


Figura 1. Difusividad vs. resistividad

Fuente: Elaboración propia.

Se sugiere utilizar un valor de difusividad térmica de $0,5 \times 10^{-6} m^2/s$ cuando se desconoce el terreno [8], lo que nos da una resistividad térmica aproximada de 1 Km/W. Para un cálculo conservador, se puede considerar una resistividad de 1,2 Km/W. La reducción de la resistividad térmica mejora la cargabilidad del cable. En [17] se estudia la composición y naturaleza del suelo en relación con las plantas y el entorno circundante, los elementos gruesos que pueden encontrarse y su vínculo con la variación de la resistividad térmica del terreno. En [5], se analiza el efecto de la formación de una zona seca alrededor de los cables subterráneos, considerándola un factor limitante para la capacidad de conducción.

b. Humedad

El suelo, desde el punto de vista hidrológico, actúa como un depósito de agua cuya capacidad de retención y almacenamiento depende de sus propiedades físicas. La figura 2 muestra la clasificación de los suelos según este enfoque.

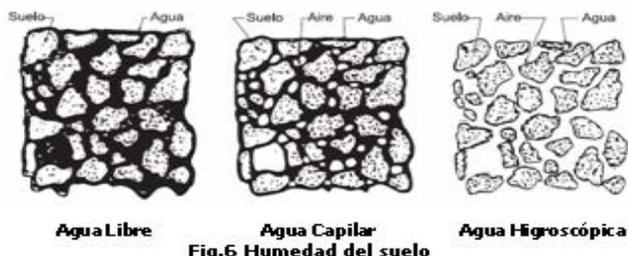


Figura 2. Humedad del suelo

Fuente: [11]

La cohesión del suelo se debe al agua absorbida que rodea sus partículas. Atterberg propone el esquema mostrado en la figura 3 y desarrolla un método que emplea distintos grados de contenido de humedad. Con un contenido muy bajo de humedad, el suelo se comporta como un sólido, mientras que, con un alto contenido, suelo y agua pueden fluir como un líquido.

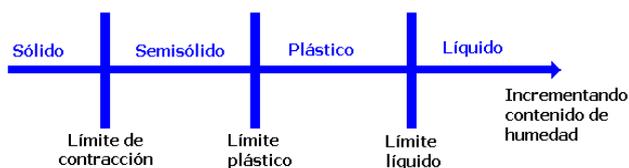


Figura 3. Límite de Atterberg

Fuente: [14].

El incremento de la humedad en el suelo favorece la cargabilidad.

c. Consistencia

El arreglo geométrico de las partículas del suelo en relación unas con otras depende de factores como la forma, el tamaño y la mineralogía de las partículas, así como de la naturaleza y composición del agua. La figura 4 muestra algunos de estos arreglos.

• Estructuras en suelos granulares

En la estructura de grano individual, las partículas del suelo están en una posición estable, en contacto unas con otras. La forma y la distribución del tamaño de las partículas influyen en la densidad.

• Estructura panaloide

En la estructura de celdas, las arenas finas y los limos forman pequeños arcos con cadenas de partículas. Presentan altos índices de vacíos y pueden soportar cargas estáticas normales. Sin embargo, bajo cargas pesadas o impactos, la estructura colapsa, lo que provoca grandes asentamientos.

• Estructura en suelos cohesivos

Existen varios tipos de estructuras en suelos cohesivos, entre las principales se encuentran las siguientes:

- Estructura dispersa: Las partículas individuales pueden asentarse muy lentamente, experimentando un movimiento browniano (en zigzag).
- Estructura floculante: Las partículas tienden a agruparse en flóculos visibles. El contacto entre partículas es cara-borde, con grandes vacíos, lo que la hace colapsable. Las uniones son electrostáticas.
- Estructura floculante tipo sal: Tienen un peso ligero y una alta relación de vacíos. Su estructura es colapsable cuando la sal se disuelve en agua dulce.

• Textura del suelo

La variedad de los suelos está dada por las combinaciones de los tipos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1
Textura del suelo

Tipo	Partículas con diámetro
Pedregoso	Mayor a 20 mm
Gravosos	Entre 2 y 20 mm
Arenas gruesas	Entre 0,2 y 2 mm
Arenas finas	Entre 0,02 y 0,2mm
Limos	Entre 0,002 y 0,02mm
Arcillas	Menor a 0,0002 mm

Fuente: Elaboración propia.

El incremento de la compactación no favorece la cargabilidad.

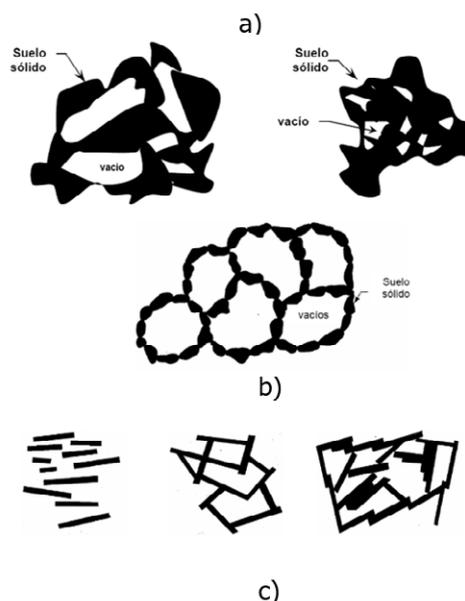


Figura 4. Consistencia de los suelos a) Estructuras de suelos granulares. b) Estructura panaloide. c) estructura de suelos cohesivos.

Fuente: Elaboración propia.

d. Composición

Los suelos son sistemas compuestos por tres componentes básicos: sólido, líquido y aire. La figura 5 muestra las proporciones utilizadas para obtener indicadores sobre la composición del suelo.

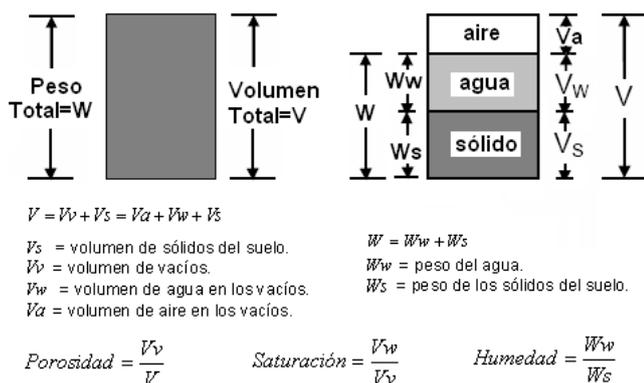


Figura 5. Composición del suelo

Fuente: [15].

B. Características del cable

a. Aspectos constructivos

• Capas

Un cable tiene, como mínimo, tres componentes: conductor, aislamiento y cubierta. En algunos casos, puede incluir más capas, como semiconductores sobre el conductor y el aislamiento, pantallas metálicas o recubrimientos adicionales. Cualquiera que sea su finalidad, es fundamental dimensionar adecuadamente cada capa y su espesor.

• Aislamiento

El espesor del aislamiento varía con el nivel de tensión al que será sometido el cable, a mayor tensión más espesor.

c. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de cables ha evolucionado con el tiempo. Al principio, la producción era más artesanal, lo que presentaba desventajas, como la contaminación. En una misma área de la fábrica se fabricaban diferentes tipos de cables, y las partículas del aislamiento de un cable se mezclaban con las de otro, provocando reacciones químicas que afectaban la capacidad, haciéndola mayor o menor de lo especificado en condiciones normales. Debido a la falta de instrumentos de precisión, los espesores de las capas presentaban un error porcentual de hasta un 8 %, usualmente por exceso. Esta irregularidad en los espesores impedía que las capas se compactaran correctamente, lo que generaba vacíos y, en consecuencia, alteraba la capacidad y la duración del cable. Con la llegada de las máquinas extrusoras y la optimización de los procesos, estos problemas fueron superados.

• Materiales

En el proceso de fabricación, es crucial el valor de la resistencia a 20 °C en corriente continua, ya que este determina las pérdidas y el grado de calor que disipa el conductor para un amperaje específico. Esto, independientemente del aumento de la resistencia en función de la temperatura, definido por lo siguiente:

$$R_t = R_{20^{\circ}C} [1 + \alpha_{20^{\circ}C} (t - 20)] \quad (2)$$

En algunos casos, se coloca un recubrimiento metálico sobre el conductor, con un espesor inferior a 0,1 mm. Este incrementa

la resistencia del conductor entre un 0,51 % y un 2,82 % (dependiendo de la sección). Su función es proteger contra la corrosión y reducir los efectos del campo magnético generado por el paso de la corriente.

b. Aspectos térmicos

La transferencia de calor sigue una ley fundamental de la física: siempre fluye del objeto más caliente al más frío. La tasa de transferencia depende de varias variables y se describe mediante una ecuación térmica similar a la Ley de Ohm, en la que la tensión se reemplaza por la diferencia de temperatura, la corriente por el flujo de calor generado por la potencia disipada del conductor, y la resistencia por la resistividad térmica equivalente [13].

$$TC - TA = WxR_{eqCA} \quad (3)$$

Donde:

- TC : Temperatura en el conductor.
- TA : Temperatura de ambiente o del suelo.
- W : Potencia disipada I^2R siendo R la resistencia eléctrica del conductor.
- R_{eqCA} : Resistencia térmica equivalente entre el conductor y el ambiente.

Entonces la corriente máxima que considerará los efectos térmicos en el conductor estará dada por:

$$I = \sqrt{\frac{TC - TA}{R_{eqCA} R}} \quad (4)$$

Las capas de un cable forman distintas superficies térmicas, lo que permite representar al cable como un circuito térmico equivalente. Para entender mejor la capacidad de corriente, es necesario examinar cómo se transfiere el calor y los circuitos térmicos que se generan en un conductor que transporta corriente. En la figura 6, T1, T2, T3 y T4 representan resistividades térmicas, siendo T4 la de mayor magnitud.

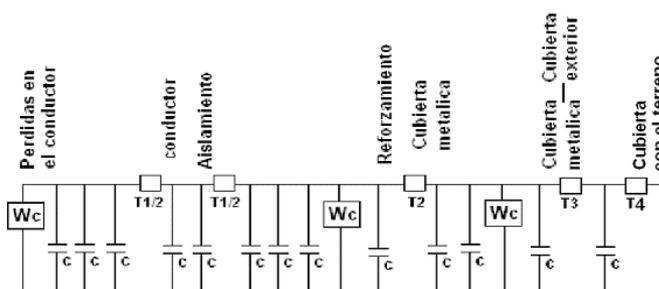


Figura 6. Circuito térmico equivalente

Fuente: [1].

C. Características de la instalación

a. Profundidad

La profundidad de instalación de los cables influye directamente en su capacidad: a mayor profundidad, menor capacidad. Es importante destacar que, en algunos casos, la profundidad de instalación también depende de factores como las distancias mínimas de seguridad, cruces, la coexistencia con sistemas de

cables telefónicos en la misma vía y disposiciones municipales o jurisdiccionales.

b. Temperatura de ambiente

A mayor temperatura ambiente, menor es la capacidad. Además, se considera la temperatura del suelo para determinar dicha capacidad.

c. Materiales de relleno de la zanja

Los materiales de relleno de la zanja, su compactación y su resistividad térmica influyen directamente en la capacidad del cable. Antes de la instalación, el terreno presenta un valor de resistividad. Al instalar los cables, la porción de tierra retirada se criba, se coloca en la zanja y se compacta. Como resultado, el terreno tendrá un equivalente de las resistividades térmicas: la original y la de la porción retirada, como se muestra en la figura 7. La resistividad térmica que tendrá mayor influencia será R_1 .

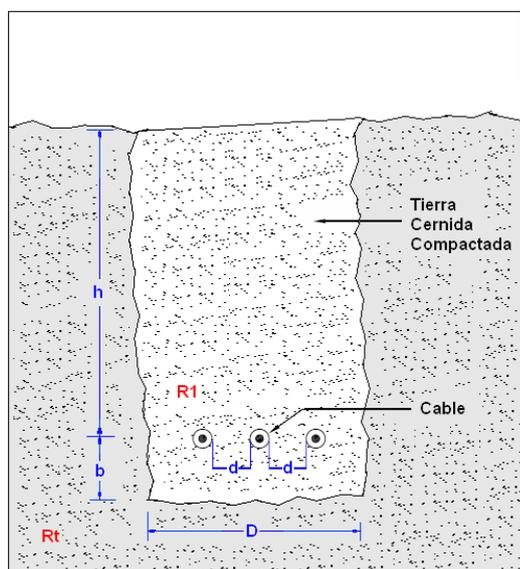


Figura 7. Características de la instalación

Fuente: Elaboración propia.

D. Características de la demanda

El comportamiento de las cargas y su tipo influye en la cargabilidad de los cables.

a. Diagrama de carga

La potencia disipada por el cable depende de la corriente, y el paso de esta incrementa la temperatura. Como la demanda varía a lo largo del día, el cable opera a diferentes temperaturas. En [8], se menciona que, al final de un periodo continuo de 6 horas, se alcanza la máxima temperatura en el cable. Es importante señalar que esta máxima temperatura no necesariamente coincide con la demanda máxima. Desde este punto de vista, el cable puede manejar diagramas de carga con algunos picos de corriente, siempre que estos no hagan que la temperatura del cable exceda su temperatura de operación nominal. Un indicador útil para evaluar la cargabilidad es el factor de carga, definido como:

$$FC = \frac{I_p}{I_m} \tag{5}$$

Donde:

- FC : Factor de carga.
- I_p : Corriente promedio.
- I_m : Corriente máxima.

Cuando un diagrama de carga es plano, el factor de carga se aproxima al 100 %, y el incremento de temperatura es continuo. Los fabricantes de cables proporcionan la capacidad basada en un factor de carga del 100 %. Sin embargo, en la práctica, el factor de carga suele ser inferior al 100 %, lo que permite que el cable soporte un mayor amperaje que el especificado por el fabricante. Conociendo el factor de carga, es posible determinar la demanda máxima admisible por el cable sin comprometer su vida útil. La figura 8 ilustra gráficamente estos conceptos.

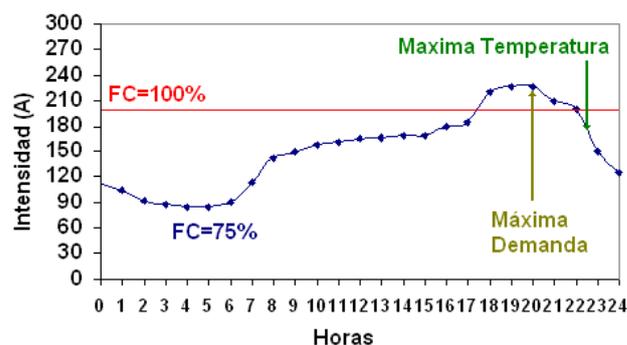


Figura 8. Comportamiento de la carga

Fuente: Elaboración propia.

Los cables, en sus especificaciones, indican un porcentaje de sobrecarga que pueden soportar durante un número determinado de horas a lo largo de su vida útil. Estas especificaciones incluyen tanto el porcentaje de sobrecarga como la cantidad de horas continuas por día en que se puede aplicar dicha sobrecarga. Bajo estas condiciones, el cable opera a la temperatura de emergencia.

b. Tipo de carga

Existen dos tipos de cargas bien diferenciadas: las lineales y las no lineales. Las cargas no lineales generan componentes armónicos que aumentan tanto la corriente como la temperatura del conductor, lo que incrementa las pérdidas. Un análisis del aumento de las pérdidas en cables debido al paso de armónicos se muestra en [12].

METODOLOGÍA

Cálculo de cargabilidad de los cables NKY

A. Geometría del cable

La figura 9 muestra la geometría de los cables NKY, junto con las resistencias térmicas aplicables para el cálculo de su capacidad. También se incluye el cálculo del diámetro del cable.

B. Datos para el cálculo

B1. Datos de instalación

Profundidad de instalación: 1 m

Resistividad térmica del terreno: 1,5 °C m/W
 Temperatura de ambiente: 25 °C
 Nivel de tensión: 10 kV.

B2. Datos del conductor

Tipo de cable: Tripolar
 Conductor: Cobre
 Aislamiento: Papel impregnado en aceite
 Chaqueta: de Plomo
 Cubierta: Termoplástico PVC
 Temperatura de operación normal: 70 °C
 Temperatura de operación en emergencia: 90 °C
 Las dimensiones son mostradas en la tabla 2.

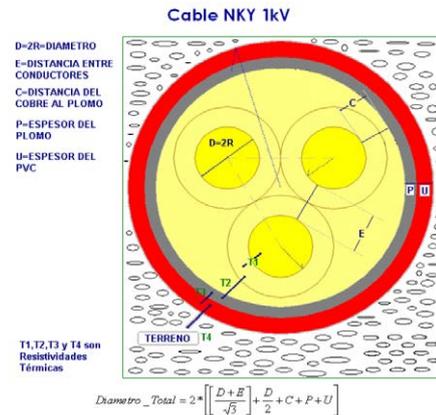


Figura 9. Geometría del cable NKY

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
 Dimensiones de los cables NKY

Sección (mm ₂)	φ conductor (mm)	Espesor Aislamiento (mm)		Espesor de Pb (mm)	Espesor PVC (mm)	φ exterior (mm)
		Entre conductores	Del Cu al Pb			
16	4,5	6,1	4,5	1,5	1,9	32,5
35	6,7	6,1	4,5	1,7	2,1	36
70	9,4	6,1	4,5	1,7	2,3	44,2
120	12,4	6,1	4,5	1,9	2,6	51,7
240	17,5	6,1	4,5	2,3	3,0	64,2

Fuente: Elaboración propia.

C. Resultados comparativos para factor de carga 100 %

La tabla 3 muestra la comparación de los cálculos realizados para factor de carga 100 %.

Tabla 3
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 100 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 287	Cálculo Cymcap
16	74	76
35	116	116
70	171	168
120	235	229
240	348	333

Fuente: Elaboración propia.

D. Resultados comparativos para factor de carga 75 %

La tabla 4 muestra los resultados del cálculo para FC = 0,75.

Tabla 4
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 75 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 853	Cálculo Cymcap
16	81	81
35	129	126
70	192	182
120	268	252
240	380	368

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los valores calculados son muy cercanos, pero en todos los casos los valores obtenidos con el software Cymcap son inferiores a los de la norma IEC. Aunque la formulación matemática del software se basa en las normas IEC, la diferencia se debe a que Cymcap utiliza elementos finitos en su proceso de cálculo, lo que le permite mayor precisión.

3.2 Cálculo de cargabilidad de los cables N2XSY

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de la capacidad de los cables N2XSY, según su geometría, las normas aplicables y la simulación realizada con el software Cymcap.

A. Geometría del cable

La figura 10 muestra la geometría de los cables N2XSY, junto con las resistencias térmicas aplicables para el cálculo de su capacidad. También se incluye el cálculo del diámetro del cable.

B. Datos para el cálculo

a. Datos de instalación

Profundidad de instalación: 1 m
 Resistividad térmica del terreno: 1.5 °C m/W
 Temperatura de ambiente: 25 °C
 Nivel de tensión: 10 kV y 22,9 kV

b. Datos del conductor

Tipo de cable: Unipolar
 Conductor: Cobre
 Aislamiento: XLPE

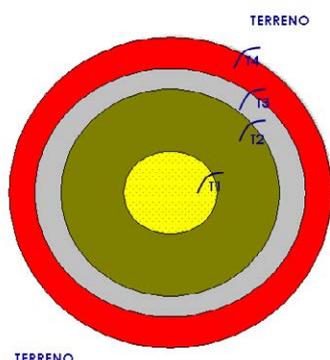
Capas de semiconductor extrudido antes y después del aislamiento

Chaqueta: Pantalla metálica de cobre recocido
 Cubierta: Termoplástico PVC
 Temperatura de operación normal: 90 °C
 Temperatura de operación en emergencia: 130 °C
 Las dimensiones de son mostradas en la tabla 5.

Tabla 5
 Dimensiones de los cables N2XSY

Sección (mm ₂)	ϕ conductor (mm)	Espesor del aislamiento (mm)	ϕ Sobre el aislamiento (mm)	Espesor PVC (mm)	ϕ exterior (mm)
25	5	4,5	15	1,8	21
35	7	4,5	16	1,8	22
70	10	4,5	17	1,8	26
120	13	4,5	22	1,9	31
240	19	4,5	28	2,0	37

Fuente: Elaboración propia.



Resistencias Térmicas	°C/W
T1	0,25
T2	0,15
T3	1,20
T4	3,50

Figura 10. Geometría del cable N2XSY

Fuente: Elaboración propia.

C. Resultados comparativos para factor de carga 100 %

La tabla 6 muestra las capacidades normadas para estos cables.

Tabla 6
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 100 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 287	Cálculo Cymcap
16	133	139
35	159	165
70	230	235
120	314	314
240	459	443

Fuente: Elaboración propia.

D. Resultados comparativos para factor de carga 75 %
 La tabla 7 muestra los resultados del cálculo para FC=0,75.

Tabla 7
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 75 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 853	Cálculo Cymcap
16	162	160
35	194	190
70	284	273
120	393	370
240	585	524

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los valores calculados con un factor de carga del 100 % son muy similares. Las principales diferencias se encuentran en los valores con un factor de carga del 75 %. La figura 11 muestra la variación de las capacidades al aumentar la sección del cable, observándose una mayor diferencia en los cálculos basados en la norma IEC a medida que la sección incrementa.

El cálculo realizado con el *software* Cymcap es más preciso porque utiliza elementos finitos. En esta configuración (tres cables unipolares), cada uno actúa como una fuente de calor. La capacidad de corriente que puede transmitir la terna se define cuando el conductor central alcanza su temperatura de operación nominal.

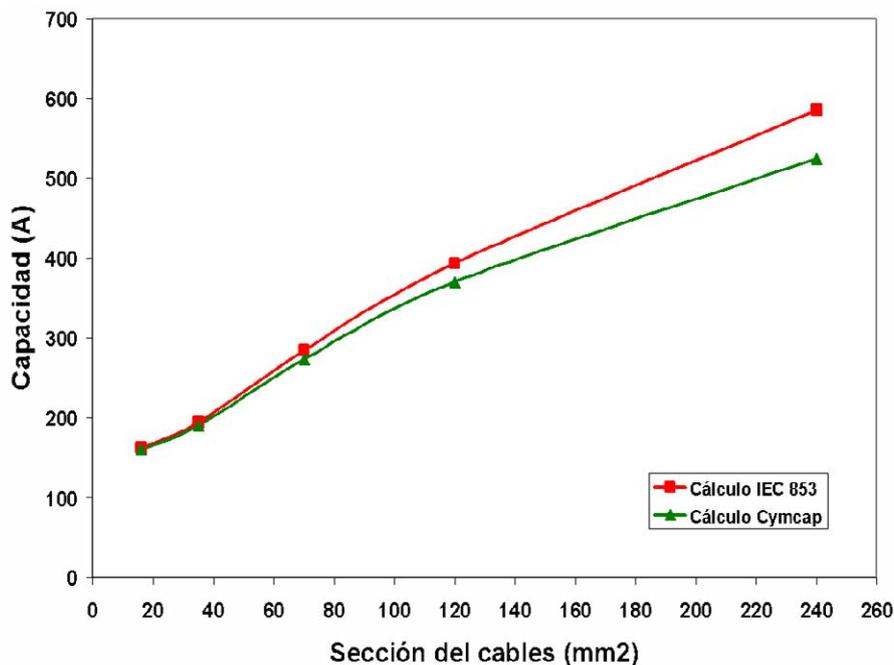


Figura 11. Variación de las capacidades calculadas para factor de carga 75 %

Fuente: Elaboración propia.

PROPUESTA PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE LOS CABLES N2XSY

La tabla 8 muestra la variación de la capacidad de una terna a medida que separamos los cables en forma horizontal y vertical.

Esto indica que levantar el cable central 5 cm equivale a separar 20 cm los cables entre sí. Si se eleva el cable central 10 cm, la mejora es aún mayor. Desde el punto de vista de la instalación, podría evaluarse la colocación de un ladrillo como soporte para el cable central, de modo que la instalación sea estable. Este componente puede colocarse a intervalos regulares a lo largo del tendido subterráneo, reduciendo los costos de instalación. En la disposición horizontal, el cable central recibe directamente el calor de los cables adyacentes; al levantarlo, el centro de calor se desplaza a una posición que no afecta directamente a ninguno de los cables. La figura 12 muestra tanto la configuración actual como la propuesta.

Tabla 8

Cuadro comparativo de las capacidades que se obtienen al cambiar la configuración de los cables N2XSY

Disposición	Capacidad (A)
Cables juntos (horizontal)	352
Cables juntos (triangular)	357
Cables a 5 cm	359
Cables a 7 cm (actual)	364
Cables a 10 cm	369
Cables a 15 cm	375
Cables a 20 cm	380
Cable central a 95 cm	381
Cable central a 90 cm	391

Fuente: Elaboración propia.

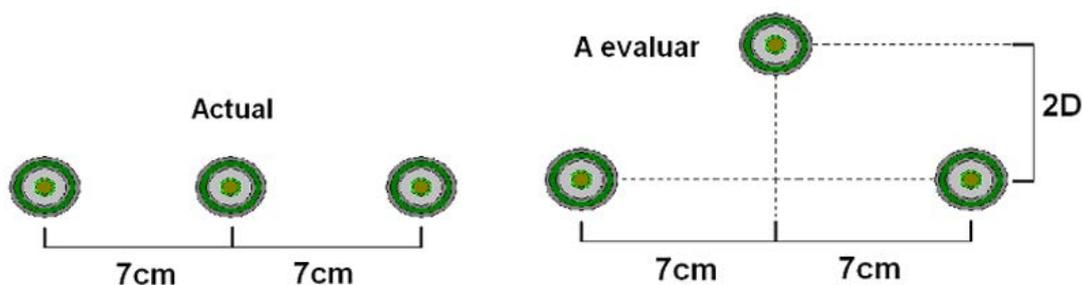


Figura 12. Configuración actual y propuesta

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este artículo podemos destacar las siguientes conclusiones:

- El análisis de la cargabilidad de los cables y su formulación matemática se basan en la transferencia de calor.
- Los factores que determinan la cargabilidad de un cable son su diseño, construcción, el medio circundante, las características de su instalación y la demanda.
- El terreno en el que se instalan los cables desempeña un papel crucial en la determinación de la capacidad. A mayor resistividad térmica, menor es la capacidad.
- En cuanto a las características del cable, los factores que más influyen en su capacidad son la resistencia DC del conductor a 20 °C y las pérdidas dieléctricas, mientras que la precisión en los espesores de las capas del cable no tiene un impacto significativo en las secciones analizadas.
- En cuanto a la instalación, los cables pierden capacidad a medida que se instalan a mayor profundidad.
- Los valores calculados con el *software* Cymcap son más precisos debido al uso del método de elementos finitos.
- En la configuración propuesta para los cables N2XSY, levantar el cable central 5 cm es equivalente a separar los cables 20 cm entre sí, lo que incrementa la capacidad de conducción de la terna en un 4,67 %.

Apéndice A: Ejemplo de cálculo de la capacidad del cable 70NKY

Cálculo según normas IEC

A1. Cálculo a FC 100 % (IEC-287-1, IEC-287-2)

La fórmula del cálculo de la capacidad de corriente para cables de cobre es la siguiente:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (6)$$

Donde:

- I: Es la intensidad de corriente que circula por el conductor (A).
- $\Delta\theta$: Es el calentamiento del conductor con respecto a la temperatura admisible (K).
- R: Es la resistencia del conductor bajo los efectos de la corriente alterna, por unidad de longitud, a temperatura máxima de operación (ohm/m).
- Wd: Son las pérdidas dieléctricas, por unidad de longitud, del aislamiento que rodea al conductor (W/m).
- T1: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre el conductor y el aislante (K.m/W).
- T2: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre el aislante y la armadura (K.m/W).
- T3: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, de la cubierta externa del cable (K.m/W).
- T4: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre la cubierta externa del cable y el medio en donde se encuentra enterrado el cable (K.m/W).
- n: Es el número de conductores aislados en servicio en el cable

(conductores de la misma sección transportando la misma carga).

Es la relación de pérdidas en la cubierta metálica o pantalla respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.

λ_2 : Es la relación de pérdidas en la armadura respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.

Cálculo de $\Delta\theta$: $\Delta\theta = 70 - 25 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Cálculo de Wd: Wd=0

Cálculo de R:

$$R = R_o (1 + y_s + y_p) (1 + \alpha_{20} (T_{m\acute{a}x} - 20)) \quad (7)$$

Ro: Resistencia del conductor en corriente continua a 20 °C

ys: Es el factor por efecto pelicular.

yp: Es el factor por efecto de proximidad.

acu = $3,93 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$

Ro = 0,000268 Ω/m

Efecto Skin:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (9)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_o (1 + \alpha_{cu} (70 - 20))} 10^{-7} k_s \quad (10)$$

ks = 1

Efecto proximidad:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (12)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_o (1 + \alpha_{cu} (70 - 20))} 10^{-7} k_p$$

kp = 0,8

R = 0,0003211 Ω/m

Cálculo de las resistencias térmicas T1, T2, T3 y T4:

T1 = 0,26835 K.m/W

T2 = 0,34874 K.m/W

T3 = 0,21387 K.m/W

T4 = 3,26863 K.m/W

Reemplazando valores en la ecuación 6 con n=1, $\lambda_1=0$, $\lambda_2=0$, tenemos:

$$I = \left[\frac{(70 - 25) - 1,696(0,5 \times 0,26835 + 0,34874 + 0,21387 + 3,26863)}{0,0003211 \times (0,26835 + 0,34874 + 0,21387 + 3,26863)} \right]^{0,5} \quad I = 170,5 \text{ A}$$

A2. Cálculo a FC 7 5% (IEC-853)

Dentro de las alternativas de cálculo que presenta la norma IEC -853, tomamos la siguiente:

Ciclo de carga de forma desconocida, en el cual solo es conocido el factor de carga de las pérdidas μ . En este caso, puede ser demostrado que el ciclo puede considerarse como puesto a carga máxima a un valor constante, y que puede ser utilizada la ecuación (13).

$$M = \frac{1}{(1 - k(1 - \mu)[1 - \beta(6)])^{0,5}} \quad (13)$$

Donde:

M : Factor de aumento a la corriente nominal.

k : Relación entre la elevación de la temperatura por encima de la temperatura ambiente de la superficie exterior del cable y la elevación de la temperatura del conductor por encima de la de ambiente en régimen permanente.

μ : Factor de carga.

$\beta(6)$: Factor de aproximación de la temperatura de la superficie exterior del cable en el período de (6) horas.

Cálculo de k :

$$k = \frac{WT_4}{\theta(\infty)}$$

$$k = \frac{28,16761 \times 3,26863}{70 - 25} = 2,0459 \quad (14)$$

Cálculo de $\beta(6)$:

$$\beta(i) = \frac{-E_i \left(-\frac{D_e^2}{16t\delta} \right)}{2 \ln \left(\frac{4L}{D_e} \right)} \quad (15)$$

$$D_e = 42,33 \text{ mm}$$

$$t = 3600 \times 6 \text{ s}$$

$$L = 1000 \text{ mm}$$

$$\frac{D_e^2}{16t\delta} = \frac{42,33^2}{16 \times 3600 \times 0,4 \times 10^{-6}} = 0,0777$$

Según el nomograma:

$$-E_i(-x) = -\ln(x) + \sum_{i=0}^5 a_i x^i = 5,306$$

$$\beta(6) = \frac{5,306}{2 \ln \left(\frac{4 \times 1000}{42,33} \right)} = 0,5832$$

Con los datos obtenidos, finalmente:

$$M = \frac{1}{(1 - 2,0459(1 - 0,75)(1 - 0,5832))^{0,5}} = 1,127$$

Entonces la corriente, a factor de carga 0,75 para un cable de cobre 70mm₂ NKY, 10 kV, es la siguiente:

$$I = 1,127 \times 170,5$$

$$I = 192,2$$

Cálculo con el software Cymcap

Para simular un cable en el software Cymcap, se siguen los siguientes pasos:

- Diseño del cable: Se identifica el cable con un nombre y se ingresan los parámetros correspondientes a las capas y materiales que lo componen.
- Diseño de la instalación del cable: Se crea el entorno donde se instalará el cable, especificando la resistividad térmica del terreno y su posición en el plano (X, Y).
- Luego, se definen las condiciones de carga, el factor de carga y los diagramas correspondientes.
- Finalmente, se simula el sistema para diferentes factores de carga (en este caso, FC = 1 y FC = 0,75) y se presentan los resultados. La figura 13 muestra los resultados de la simulación para el cable 70 NKY.

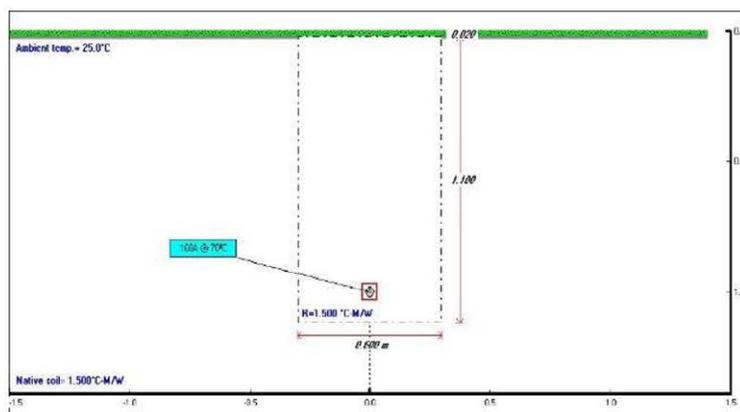
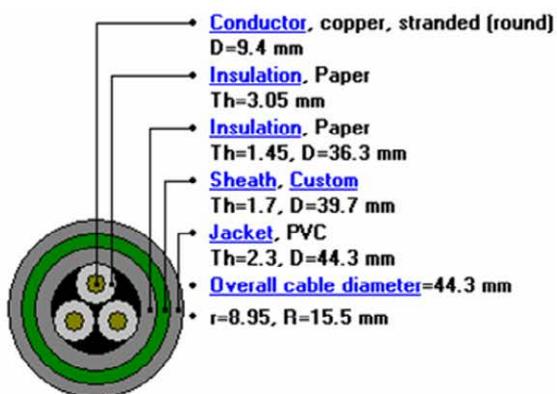


Figura 13. Simulación del cable 70 NKY

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B: Ejemplo de cálculo de la capacidad del cable 240N2XSJ

Cálculo según normas IEC

A1. Cálculo a FC 100 % (IEC-287-1, IEC-287-2)

Para realizar este cálculo se sigue el procedimiento de los apéndices A.1 y A2, así como las consideraciones de la norma.

$$\text{Cálculo de } \Delta\theta: \Delta\theta = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Cálculo de } W_d: W_d = 0$$

$$\text{Cálculo de } R: R = 0,000098533 \Omega/\text{m}$$

Cálculo de las resistencias térmicas T1, T2, T3 y T4:

$$T1 = 0,21600 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

$$T2 = 0 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

$$T3 = 0,09373 \text{ (K}\cdot\text{m}/\text{W)}$$

$$T4 = 2,81773 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

Reemplazando valores en la ecuación 6 con $n=1$, $\lambda_1=0$, $\lambda_2=0$, tenemos a continuación:

$$I = \left[\frac{(90 - 25) - 0}{0,000098533 \times (0,21600 + 0,09373 + 2,81773)} \right]^{0,5} I = 459,4$$

A2. Cálculo a FC 75 % (IEC-853)

Dentro de las alternativas de cálculo que presenta la norma IEC-853, tomamos la siguiente:

$k = 2,792$
 $\beta(6) = 0,432$
 $M = \frac{1}{(1 - 2,792(1 - 0,75)(1 - 0,432))^{0,5}} = 1,274$

Entonces, la corriente a factor de carga 0,75 para un cable de cobre 6mm₂ NKY, 1kV es la siguiente:

$I = 1,274 \times 459$
 $I = 585$

Cálculo con el software Cymcap

La figura 14 muestra los resultados de la simulación para el cable 240N2XSJY.

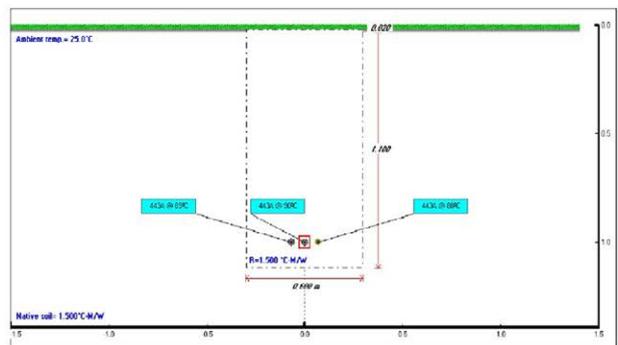
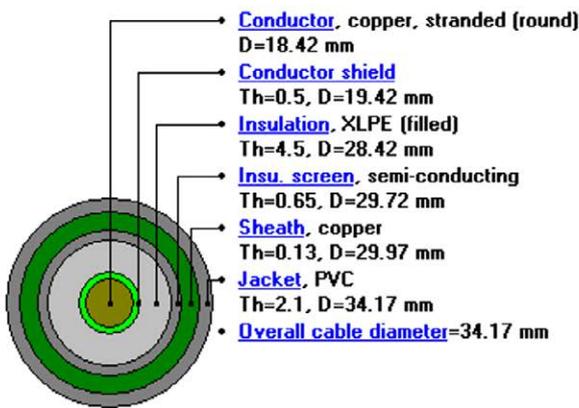


Figura 14. Simulación del cable 240N2XSJY

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C: Cables de MT en condición de agrupamiento

Cables de media y baja tensión en una misma zanja

La figura 15 muestra la condición en que los cables de MT se encuentran con los cables de BT.

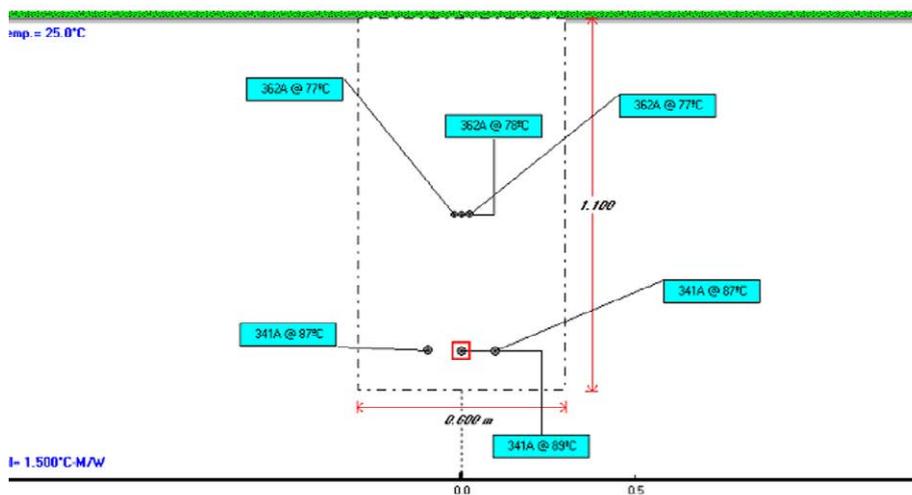


Figura 15. Cables en agrupamiento MT y BT

Fuente: Elaboración propia.

En esta configuración, los cables de media y baja tensión ven disminuida su capacidad debido a la presencia de más fuentes de calor en el mismo entorno. En comparación con el cálculo de la capacidad de los cables de forma independiente, los cables de baja tensión se ven más afectados que los de media tensión, ya que la mayor parte del calor tiende a ascender hacia la superficie.

Cables de MT en salida de SET

La figura 16 muestra la situación en la que los cables de media tensión (MT) se agrupan en la salida de la subestación (SET). En este caso, el cable central es el que recibe el calor de los cables adyacentes. Cuando el cable central alcanza su temperatura de operación nominal, se toma la capacidad de la terna central y se define la capacidad del agrupamiento.

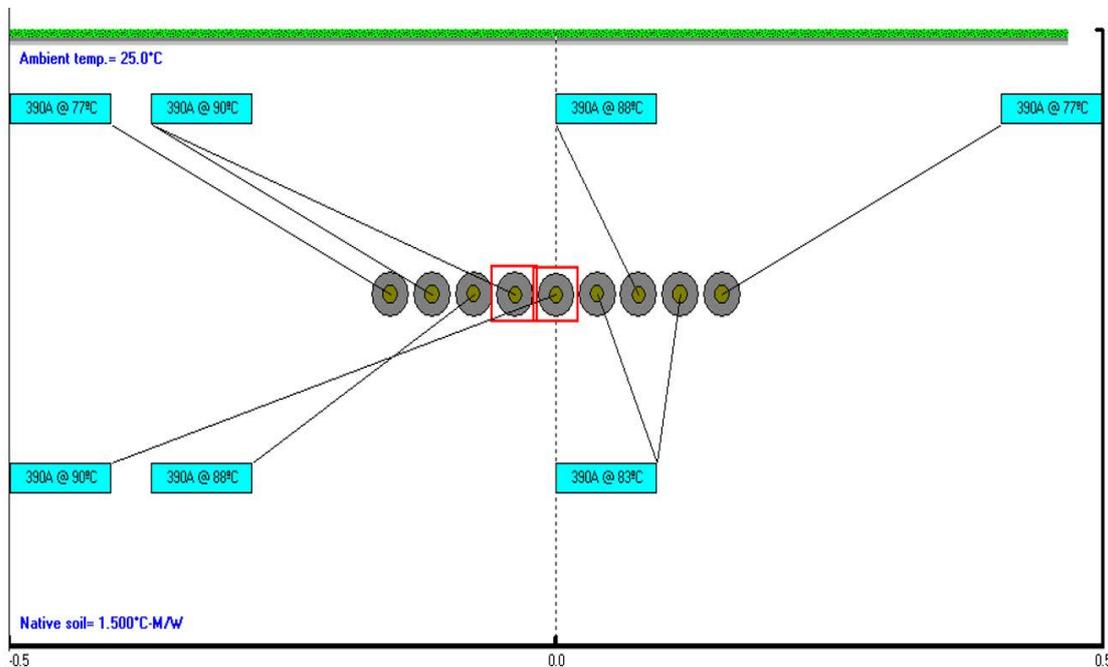


Figura 16. Cables en agrupamiento en salida de SET

Fuente: Elaboración propia.

A medida que se agregan ternas al agrupamiento, la capacidad se redefine utilizando el término «factor de agrupamiento». La tabla 9 muestra cómo este factor varía a medida que aumenta el número de ternas. (Es importante señalar que estos resultados son referenciales).

Tabla 9
Factor de agrupamiento de cables en MT

Ternas	Factor
4	0,838
5	0,805
6	0,780
7	0,763
8	0,749
9	0,739
10	0,730
11	0,723
12	0,718
13	0,713
14	0,708

Fuente: Elaboración propia.

El factor de agrupamiento disminuye a medida que se agregan más ternas. Sin embargo, se observa que este decrece de manera menos significativa cuando se superan las 10 ternas. Se recomienda emplear más de 15 ternas en la salida de subestaciones, ya que la contribución de calor de los cables de los extremos sobre el cable central se reduce considerablemente a partir de ese punto.

REFERENCIAS

- [1] Anders, G. (2005). *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*. Wiley-IEEE Press.
- [2] Bates, C., Malmedal, K. & Cain, D. (2015). Cable ampacity calculations: A comparison of methods. *IEEE Rural Electric Power Conference*, 81-87. <https://doi.org/10.1109/REPC.2015.13>
- [3] Cardenas, D. (2020). Thermal-conductive model algorithm for the accurate calculation of temperatures in electrical power conductor. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- [4] Exizidis, L., Chatziathanasiou, V. & Henny, B. (2014). Thermal analysis of underground cable crossings at various crossing angles. *9th Mediterranean Conference on Power*

Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, marzo.

- [5] Gouda, O., El Dein, A. & Amer, G. (2011). Effect of the formation of the dry zone around underground power cables on their ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2), 972-978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>
- [6] Hechavarría, R., et al. (2017). Cálculo numérico de las propiedades térmicas efectivas de un compuesto por elementos finitos. *Ingenius*, (18), 14-20.
- [7] IEC 60287 (2022). *Electric cables - Calculation of the current rating*.
- [8] IEC 60853 (2002). *Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables*.
- [9] Jaramillo-Vacio, R. (2018). Determinación de capacidad de conducción en líneas subterráneas: Estudio de sensibilidad paramétrica. *IEEE - RVP Al Reunión de Verano de Potencia*, julio.
- [10] Karahan, M., Varol, H. & Kalenderli, O. (2009). Thermal analysis of power cables using finite element method and current carrying capacity evaluation. *International Journal of Engineering Education*, 1158-1165.
- [11] Maderey, L. & Jiménez, A. (2005). *Principio de hidrogeografía, estudios del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de México. www.diplomado-sig.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/
- [12] Madrigal, M. (2003). *Análisis armónico en sistemas de potencia*. México: Instituto tecnológico de Morelia.
- [13] Newton, G. (2000). Understanding the Neher-McGrath calculation and the ampacity of conductors.
- [14] Puy, A. (2005). *Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad*. Universidad Politécnica de Catalunya. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3282/5/53973-5.pdf>
- [15] Rasoulpoor, M., Mirzaie, M. & Mirimani, S. M. (2016). Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 12(1).
- [16] Rerak, M. & Oclo'n, P. (2017). The effect of soil and cable backfill thermal conductivity on the temperature distribution in underground cable system. *4th Scientific and Technical Conference on Modern Technologies and Energy System*, 13, February.
- [17] Rubio, C. (2016). La relación entre resistividad térmica, humedad y un suelo arenoso pedregoso. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 6(2), 123-132.

- [18] Wang, P. et al. (2019). Dynamic thermal analysis of high-voltage power cable insulation for cable dynamic thermal rating. *IEEE Access*, 7, 56095-56106. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913704>

ACERCA DEL AUTOR

D.SC. OSCAR JULIAN PEÑA HUARINGA

Doctor en Ciencias con Mención en Energética por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Máster en Gestión de las Energías Renovables por la Universidad de Barcelona (Uniba). Maestro en Ciencias con Mención en Sistemas de Potencia, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Ingeniero electricista por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Docente en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa (UNSA), del diploma de Especialización en Protección de Sistemas Eléctricos de ESAN y del programa de premaestría en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional de Ingeniería. Actualmente es gerente de la empresa Power & Technology Systems (PTSYS).

@ oscar.pena.h@uni.edu.pe

@ oscar@ptsys.com.pe

D.SC. WALTER FRANCISCO ESTRADA LOPEZ

Doctor en Ciencias con especialidad en Física por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Profesor principal con actividad docente e investigador en la Universidad Nacional de Ingeniería. M.Sc. Ciencias con especialidad en Ciencias de los Materiales por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Especialista e investigador en estructura de materiales y microscopía electrónica.

@ westrada@uni.edu.pe

Recibido: 15-02-24

Revisado: 18-07-24

Aceptado: 27-07-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Creación de escenarios de vuelo
**simulados, bajo distintas
condiciones climáticas y
operativas.**



Evaluación del desempeño de los sistemas de control automático en aeronaves comerciales y privadas en el simulador de vuelo FSX

Performance Evaluation of Automatic Control Systems in Commercial and Private Aircraft Using the FSX Flight Simulator

RESUMEN

Este estudio tiene como propósito examinar el desempeño de los sistemas de control automático de rumbo y altitud en aeronaves comerciales y privadas mediante el uso del simulador de vuelo FSX. La investigación emplea una metodología experimental que consiste en la creación de diversos escenarios de vuelo simulados, bajo distintas condiciones climáticas y operativas. Los datos obtenidos de estas simulaciones son analizados para evaluar el comportamiento de los sistemas automáticos, y se enfoca en parámetros clave como el error, el tiempo de asentamiento y el tiempo de respuesta.

Los principales hallazgos muestran que la categoría de la aeronave y las condiciones climáticas, como las precipitaciones, la velocidad y la dirección del viento, tienen un impacto significativo en la respuesta de los sistemas de control automático. Estas variables afectan la señal de error y el tiempo de asentamiento, lo que es crucial para determinar la estabilidad de la aeronave bajo diversas condiciones operativas.

El análisis de la respuesta transitoria y la señal de error revelan que la función de transferencia es única y específica para cada tipo de avión. Este hallazgo subraya la importancia de desarrollar y optimizar sistemas de control automático que sean robustos, fiables y adaptables a las características particulares de cada aeronave y a las condiciones de vuelo simuladas.

En conclusión, este estudio proporciona información esencial para el diseño y la evaluación de sistemas de control automático en la aviación comercial. Los resultados obtenidos destacan la necesidad de integrar estas consideraciones en el desarrollo de tecnologías que promuevan una mayor estabilidad, seguridad y eficiencia operativa en el transporte aéreo. Este enfoque integral es fundamental para mejorar la seguridad y la confiabilidad en las operaciones aéreas, especialmente en entornos desafiantes.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the performance of automatic heading and altitude control systems in commercial and private aircraft using the FSX flight simulator. The research employs an experimental methodology involving the creation of various simulated flight scenarios under different weather and operational conditions. Data obtained from these simulations are analyzed to assess the behavior of the automatic systems, focusing on key parameters such as error, settling time, and response time.

The main findings indicate that the aircraft category and weather conditions, such as precipitation, wind speed, and wind direction, have a significant impact on the performance of automatic control systems. These variables affect the error signal and settling time, which are crucial for determining the aircraft's stability under various operating conditions.

The analysis of the transient response and error signal reveals that the transfer function is unique and specific to each type of aircraft. This finding highlights the importance of developing and optimizing automatic control systems that are robust, reliable, and adaptable to the particular characteristics of each aircraft and the simulated flight conditions.

In conclusion, this study provides essential information for the design and evaluation of automatic control systems in commercial aviation. The results highlight the need to integrate these considerations into the development of technologies that enhance stability, safety, and operational efficiency in air transport. This comprehensive approach is crucial for improving safety and reliability in air operations, particularly in challenging environments.



Palabras Claves

Sistema de control automático, simulación FSX, señal de error, estabilidad de vuelo, respuesta transitoria, MATLAB.

Key words

Automatic control system, FSX simulation, error signal, flight stability, transient response, MATLAB.

INTRODUCCIÓN

Controlar una aeronave en vuelo es una tarea compleja que requiere una evaluación constante del rendimiento de los sistemas de control automático bajo diversas condiciones. El uso de un simulador de vuelo para esta evaluación es una alternativa práctica y efectiva, permitiendo reducir significativamente los costos operativos y de mantenimiento. Los sistemas de control automático son fundamentales para la operación segura y eficiente de las aeronaves comerciales y privadas; una evaluación inadecuada de estos sistemas puede comprometer la estabilidad de vuelo y, en situaciones extremas, aumentar el riesgo de incidentes o accidentes.

Con los avances tecnológicos, como los motores a reacción de largo alcance y las computadoras de alta precisión para la navegación, el rendimiento de las aeronaves ha mejorado notablemente, especialmente en situaciones de perturbaciones. Sin embargo, la falta de integración de sistemas de control optimizados puede aumentar el tiempo de respuesta ante perturbaciones atmosféricas, lo cual, según estudios previos, ha sido un factor contribuyente en varios incidentes en condiciones meteorológicas adversas.

En la década de 1970, se introdujeron los sistemas *fly-by-wire*, que emplean computadoras para coordinar movimientos precisos de las superficies de control, reemplazando los cables y mecanismos hidráulicos tradicionales. Estos sistemas permiten respuestas extremadamente precisas y cumplen con las rutas planificadas. Según Miller y White [9], los sistemas *fly-by-wire* han revolucionado la aviación al ofrecer mayor precisión, reducción de peso y mayor confiabilidad en el control de vuelo. Sin embargo, operar con estos modernos sistemas implica altos costos de operación, mantenimiento y entrenamiento, por lo que el uso de simuladores es una solución viable para recrear escenarios de prueba y verificar parámetros, reduciendo considerablemente los costos y la logística asociados a las comprobaciones en aeronaves reales.

Este estudio analiza cómo los sistemas de control de las aeronaves responden a perturbaciones, permitiendo calcular y observar sus respuestas en diversas condiciones de vuelo. Según Anderson [1], la capacidad de las aeronaves para mantener la estabilidad y corregir desviaciones rápidamente es fundamental para la seguridad de los vuelos comerciales, ya que reduce el riesgo de incidentes en condiciones adversas.

García y Martínez [4] sostienen que el uso de gemelos digitales permite crear réplicas virtuales precisas de los sistemas físicos, mejorando la capacidad de simulación y análisis en tiempo real. Estos modelos virtuales son esenciales para estudiar el comportamiento de las aeronaves en diferentes condiciones operativas.

Los avances en tecnología de la información y en computación digital han permitido la creación de simuladores sofisticados, como gemelos digitales y entornos de realidad virtual. Los simuladores de vuelo, como FSX, han transformado el entrenamiento de pilotos y el análisis aeronáutico en diversos contextos operativos. Este estudio se centra en evaluar la respuesta de las aeronaves mediante la creación de escenarios de simulación de vuelo en Flight Simulator X, con el fin de observar el comportamiento de los sistemas de control automático ante perturbaciones y mejorar la comprensión de su funcionamiento mediante la abstracción que permite la simulación.

FUNDAMENTOS

Los sistemas de control automático son esenciales para la operación segura y eficiente de las aeronaves modernas. Estos sistemas gestionan la estabilidad y la trayectoria de la aeronave, ajustando automáticamente los controles de vuelo para mantener las condiciones deseadas sin intervención constante del piloto. Desde la introducción de los sistemas *fly-by-wire* en los años 70, las aeronaves han evolucionado de controles mecánicos e hidráulicos a sistemas electrónicos, que ofrecen mayor precisión y fiabilidad. Según Stevens y Lewis [15], los sistemas modernos integran algoritmos sofisticados que mejoran el rendimiento y la seguridad en condiciones adversas de vuelo. Los sistemas avanzados de control, como los controladores adaptativos, robustos y predictivos, están diseñados para gestionar estas condiciones y minimizar su impacto en el vuelo, ajustando dinámicamente sus parámetros para mantener la estabilidad y trayectoria deseadas.

Los sistemas de control en lazo cerrado son fundamentales para asegurar la estabilidad y el control preciso de una aeronave en diversas condiciones de vuelo. El control de actitud estabiliza la aeronave en relación con el horizonte, utilizando mediciones de *pitch* (inclinación vertical) y *roll* (inclinación lateral). Por su parte, el control de rumbo asegura que la aeronave siga una trayectoria precisa hacia un punto deseado, como se ilustra en la Figura 1.

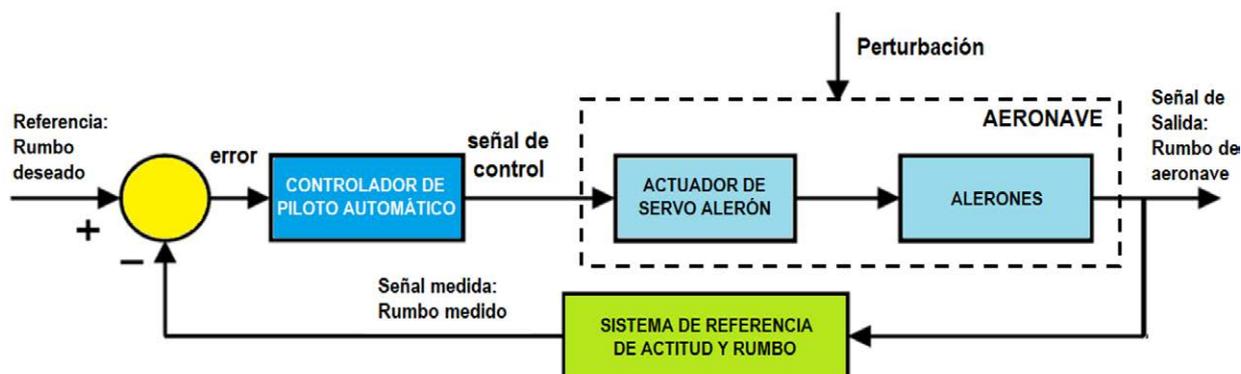


Figura 1. Lazo de control de rumbo

Fuente: Elaboración propia.

Además, el control de altitud mantiene la aeronave en la altitud de crucero deseada, como se muestra en la figura 2, mientras que el

control de régimen de ascenso y descenso gestiona las tasas de cambio vertical para optimizar la eficiencia y la seguridad.

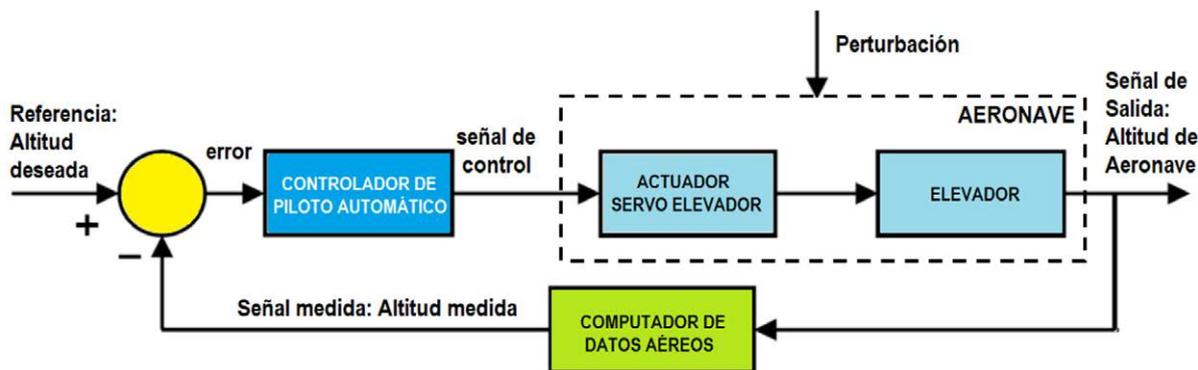


Figura 2. Lazo de control de altitud

Fuente: Elaboración propia.

Los tipos de navegación LNAV (navegación lateral) y VNAV (navegación vertical), en los que se aplica el control automático, gestionan la estabilidad y la trayectoria de la aeronave ajustando las superficies de control de vuelo en los canales de alabeo, cabeceo

y guiñada. En los lazos de control desarrollados en el presente artículo, el control de rumbo corresponde a la navegación LNAV, mientras que el control de altitud corresponde a la navegación VNAV, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1
Lazos de control aplicables al tipo de navegación

Tipo de navegación	Lazo de control analizado	Movimientos de control		
		Alabeo	Cabeceo	Guiñada
LNAV Curso, rumbo, ruta deseada (plan de vuelo)	Rumbo	Movimientos coordinados de alerones	Sin movimiento de elevadores	Movimiento con el timón de dirección respecto al norte
VNAV Altitud, ascensos y descensos, aproximación y aterrizaje	Altitud	Sin movimiento de alerones	Movimiento de elevadores al valor deseado	Sin movimiento del timón de dirección

El estudio del rendimiento de aeronaves mediante simuladores de vuelo ha sido objeto de numerosas investigaciones en ingeniería aeronáutica y computación. Desde el siglo xx, los avances en tecnologías de la información y la capacidad de procesamiento han permitido el desarrollo de simuladores cada vez más sofisticados. Smith y Jones [13] explican que el desarrollo de simuladores de vuelo comenzó en la década de 1920 con el objetivo de entrenar a pilotos en técnicas básicas de vuelo. Con la evolución de la tecnología digital y los gráficos en tres dimensiones, estos simuladores han alcanzado niveles de realismo sin precedentes.

Los simuladores no solo replican la experiencia de vuelo, sino también el funcionamiento integral de los sistemas de una aeronave. Brown y Green [2] enfatizan que esto permite a los profesionales de mantenimiento familiarizarse con dichos sistemas, practicar diagnósticos de fallas y realizar reparaciones de manera segura y eficiente. Estos avances subrayan la importancia de nuestra investigación en la optimización de los sistemas de control automático, proporcionando una base sólida para mejorar la estabilidad y eficiencia operativa de las aeronaves.

La evaluación del desempeño de los sistemas de control automático se realiza mediante el estudio de la respuesta transitoria, evaluando parámetros como error, tiempo de

asentamiento, sobreelongación máxima, tiempo de retardo, tiempo de levantamiento y tiempo pico, mostrados en la figura 3. Según Ogata [11], estos parámetros son cruciales para determinar la eficacia de un sistema de control y su capacidad para mantener las condiciones deseadas bajo diversas perturbaciones. Johnson y Lee [7] destacan que estos parámetros son esenciales para evaluar la eficiencia del sistema en la conservación de las condiciones óptimas frente a perturbaciones. Las simulaciones en FSX permiten recopilar estos datos de manera detallada y en un entorno controlado, facilitando un análisis exhaustivo y preciso.

El criterio de desempeño comúnmente utilizado para representar las características de un sistema de control lineal en el dominio del tiempo se basa en la evaluación de los siguientes parámetros, cuando la función de entrada del sistema es un escalón unitario:

1. Sobreelongación máxima (Mp): es la cantidad en que la curva de salida sobrepasa el valor final, expresada en porcentaje.
2. Tiempo de retardo (Td): es el tiempo necesario para que la respuesta del sistema alcance la mitad del valor final por primera vez.

3. Tiempo de asentamiento (T_s): es el tiempo necesario para que las oscilaciones transitorias amortiguadas alcancen y permanezcan dentro del $\pm 2\%$ o $\pm 5\%$ del valor final o de estado estable.
4. Tiempo de levantamiento (T_r): es el tiempo requerido para que la respuesta del sistema pase del 10% al 90% del valor final.

5. Tiempo pico (T_p o $T_{m\acute{a}x}$): es el tiempo necesario para que la respuesta del sistema alcance el pico del levantamiento máximo.

Una respuesta típica de un sistema de control a una entrada escalón unitario se muestra en la figura 3:

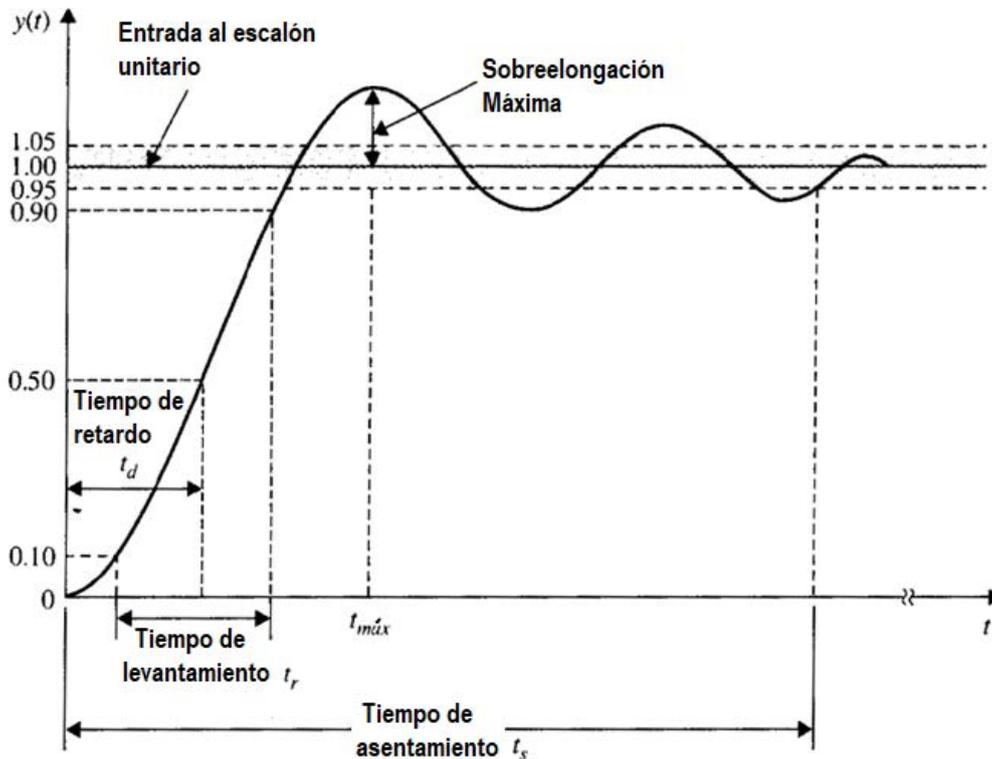


Figura 3. Curva de respuesta transitoria

Fuente: [11].

Las perturbaciones durante el vuelo, como condiciones climáticas adversas (viento, turbulencias, precipitaciones), pueden afectar significativamente el desempeño de los sistemas de control automático. Miller y White [9] afirman que la capacidad de una aeronave para responder adecuadamente a estas perturbaciones es crucial para la seguridad.

Las limitaciones de este estudio incluyen la precisión del simulador en comparación con los simuladores profesionales de nivel D según la normativa FAA AC 120-40B [3]. Sin embargo, el presente análisis permite estudiar adecuadamente el desempeño de los sistemas de control automático en condiciones similares al comportamiento real de una aeronave.

Para comprender el comportamiento dinámico de los sistemas de control automático en las aeronaves simuladas, se utiliza el concepto de función de transferencia, que modela la relación entre la entrada del sistema (como perturbaciones externas) y la salida (respuesta del control automático). Según Ogata [11], la función de transferencia de un sistema de primer orden se expresa mediante la ecuación:

$$T(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Dónde: K es la ganancia del sistema, τ es la constante de tiempo, y s es la variable en el dominio de Laplace. Esta fórmula es esencial para analizar cómo los sistemas automáticos de las aeronaves ajustan las superficies de control ante cambios operacionales, como fluctuaciones en el viento o turbulencias, utilizando el simulador FSX. Además, para examinar la respuesta transitoria del sistema ante una entrada escalón, se aplica la siguiente ecuación:

$$y(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\zeta\omega_n}{\omega_d} \sin \omega_d t \right)$$

Donde ζ es el coeficiente de amortiguamiento, ω_n la frecuencia natural, y ω_d la frecuencia amortiguada. Esta ecuación describe cómo el sistema de control corrige las perturbaciones durante el vuelo, buscando minimizar el error y estabilizar la aeronave en el menor tiempo posible.

METODOLOGÍA

La metodología de este estudio emplea el simulador Flight Simulator X (FSX) para evaluar el comportamiento de las aeronaves en distintos escenarios de vuelo, proporcionando un entorno controlado y realista [12]. La investigación se divide en tres fases principales.

Fase 1: Preparación del escenario en el simulador FSX

En la primera fase, se configura el simulador con tres aeronaves representativas: Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP. Se establecen altitudes de prueba entre 2000 y 9000 pies, como se muestra en el patrón de vuelo de la figura 4, con velocidades de 260 nudos para los aviones comerciales y 180 nudos para el Cessna. El vuelo comienza con un rumbo de 155°, ajustado posteriormente a 245°, como se ilustra en la figura 5, y se realiza en las cercanías del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez para lograr un entorno de simulación realista, tal como sugieren Kramer y Anderson [8].

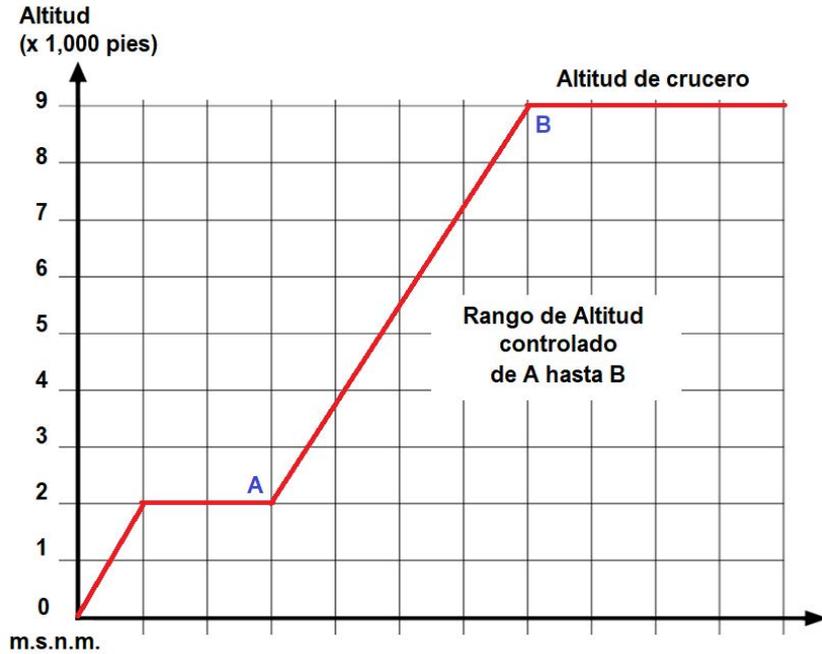


Figura 4. Patrón de vuelo de altitud

Fuente: Elaboración propia.

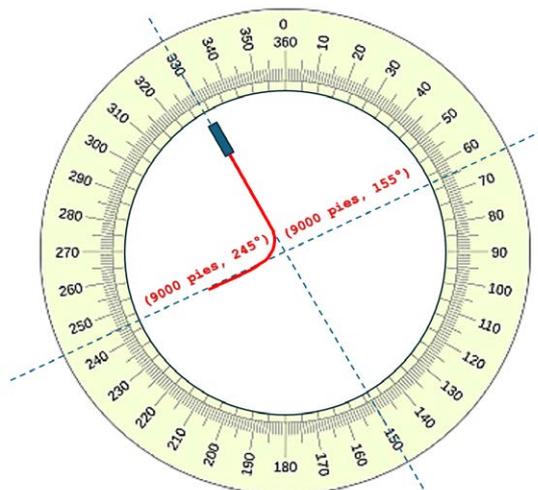


Figura 5. Patrón de control de rumbo

Fuente: Elaboración propia.

En la primera serie de simulaciones, se ajustan las condiciones meteorológicas para incluir viento calmo y ausencia de turbulencia, garantizando un entorno de vuelo controlado. En la segunda serie, se introducen perturbaciones dinámicas, como nubes, viento y visibilidad, tal como se muestra en la tabla 2, siguiendo las recomendaciones de Harris y Clarke [5]. La magnitud y frecuencia de estas perturbaciones se definen cuidadosamente para evaluar las respuestas del sistema de control automático frente a diferentes tipos de esfuerzos.

Tabla 2
Condiciones meteorológicas aplicadas al vuelo con perturbación

Parámetro de perturbación	Grado de perturbación
Nubes	Tipo: Cumulus Cobertura: 2/8 Turbulencia: Severa Rango: 0 a 10 000 ft MSL
Viento	Velocidad: 36 knots Dirección: 155° Turbulencia: Severa Rango: 0 a 9 500 ft MSL
Visibilidad	Ilimitada

Además, se incorporan variaciones en el rumbo de vuelo, ajustando el curso de 155° a 245°. Esta variación permite evaluar la capacidad del sistema de control automático para manejar cambios en la trayectoria y mantener la estabilidad durante maniobras de giro, como se describe en el trabajo de Smith y Brown [14]. Durante esta fase, se realizan maniobras tanto estándar como no estándar para evaluar exhaustivamente la respuesta del sistema bajo diversas condiciones de vuelo.

Con el fin de realizar un análisis comparativo del desempeño de los sistemas de control automático de las aeronaves Airbus A320 y Boeing 737-800, ambas se configuraron con un MTOW (peso máximo de despegue) de 167 000 libras.

Fase 2: Tabulación y análisis de tiempos de respuesta a cambios de rumbo y altitud

En la segunda fase, se tabulan y analizan los tiempos de respuesta a cambios de rumbo y altitud. Se mide el tiempo que tarda la aeronave en ajustar su altitud de 2000 a 9000 pies y en modificar su rumbo dentro del rango especificado, tanto en presencia de perturbaciones como en condiciones normales. Se recopilan datos detallados sobre los parámetros de control y el comportamiento del sistema durante estas transiciones, tal como se describe en el estudio de Johnson y Lee [7].

Estos datos se analizan para identificar patrones y evaluar la precisión y eficacia de los sistemas automáticos de control de vuelo. Se emplean técnicas de análisis de sistemas dinámicos para evaluar cómo el sistema de control automático maneja las variaciones en rumbo y altitud, proporcionando una visión clara de su capacidad para mantener la estabilidad y cumplir con las trayectorias de vuelo planificadas, siguiendo el enfoque de Nguyen y Kim [10].

Fase 3: Obtención de datos

En la tercera fase, se registran datos experimentales de rumbo y altitud de vuelos de aeronaves utilizando el simulador. Estos datos se plotean posteriormente en MATLAB para un análisis detallado.

Los datos se recolectan en dos escenarios distintos: con y sin perturbaciones, con un muestreo cada cinco segundos para capturar adecuadamente la dinámica del vuelo. Este enfoque permite observar y analizar las curvas resultantes tanto en condiciones ideales como en presencia de perturbaciones.

La recopilación de datos se enfoca en parámetros críticos como el error, tiempo de muestreo, rumbo y altitud, en escenarios con y sin perturbaciones. Para el análisis de la información, se consideran parámetros como el tiempo de asentamiento, sobreealongación máxima, tiempo de retardo, tiempo de levantamiento, tiempo pico y error.

Los datos se analizaron y visualizaron mediante curvas representativas ploteadas en MATLAB, generando curvas de error y respuesta transitoria que permiten una interpretación clara y concisa de la capacidad de los sistemas de control automático para mantener la estabilidad del vuelo.

A partir de los datos obtenidos, se realizó el análisis de las curvas de error correspondientes a los vuelos de cada aeronave en distintas configuraciones. El área bajo la curva de error se calculó mediante la integración de los datos muestreados, lo que permitió realizar un análisis cuantitativo para evaluar la eficiencia de cada sistema de control automático.

Para calcular parámetros como el tiempo de asentamiento, sobreealongación máxima, tiempo de retardo, tiempo de levantamiento y tiempo pico, se siguieron los fundamentos detallados en la figura 3, y el análisis de las curvas se realizó mediante el cálculo de los parámetros correspondientes.

RESULTADOS

A partir del análisis de los datos de rumbo y altitud recopilados, se obtuvieron curvas correspondientes a la respuesta transitoria de salida y al error en dos escenarios de vuelo (con y sin perturbación) para las tres aeronaves seleccionadas en el estudio.

A continuación, se presentan las siguientes curvas de desempeño:

A. Curvas de desempeño del control de rumbo

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Airbus A320, con perturbación y sin perturbación para el rumbo.

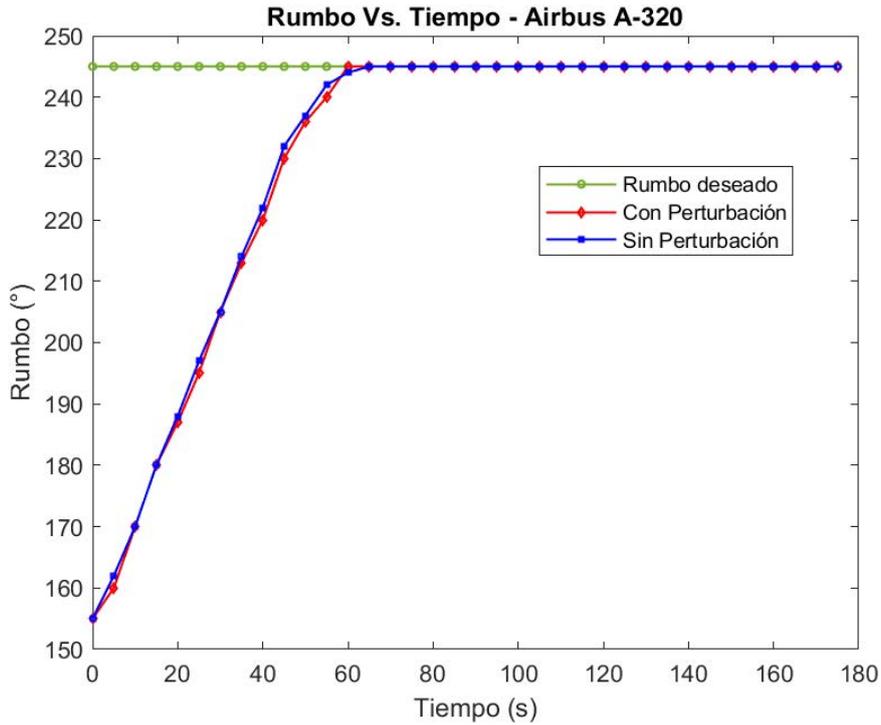


Figura 6. Curva de respuesta de salida de rumbo de la aeronave Airbus A320

Fuente: Elaboración propia.

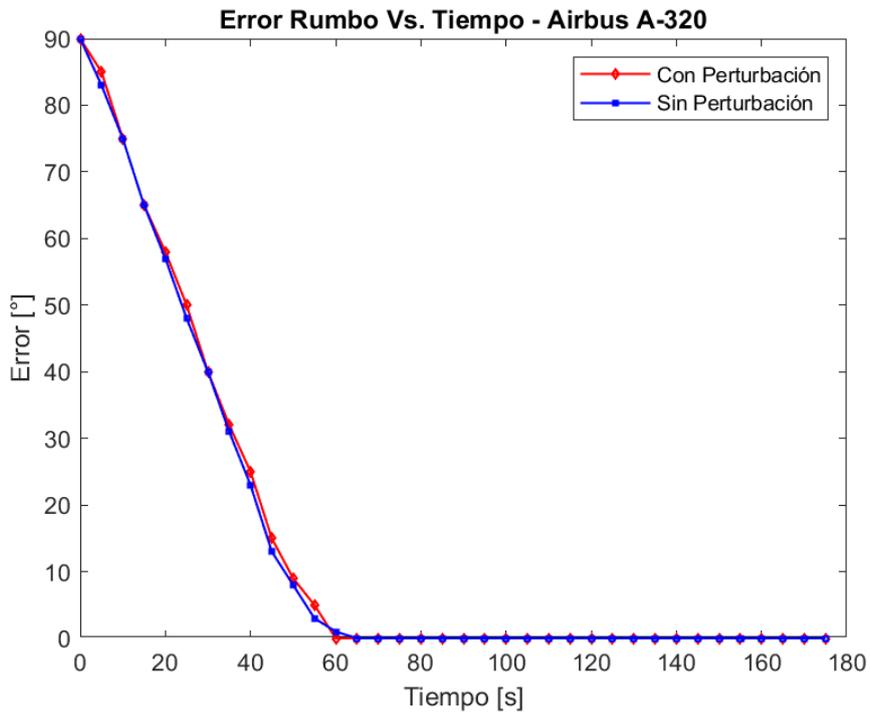


Figura 7. Curva del error de rumbo de la aeronave Airbus A320

Fuente: Elaboración propia.

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Boeing 737-800, con perturbación y sin perturbación para el rumbo.

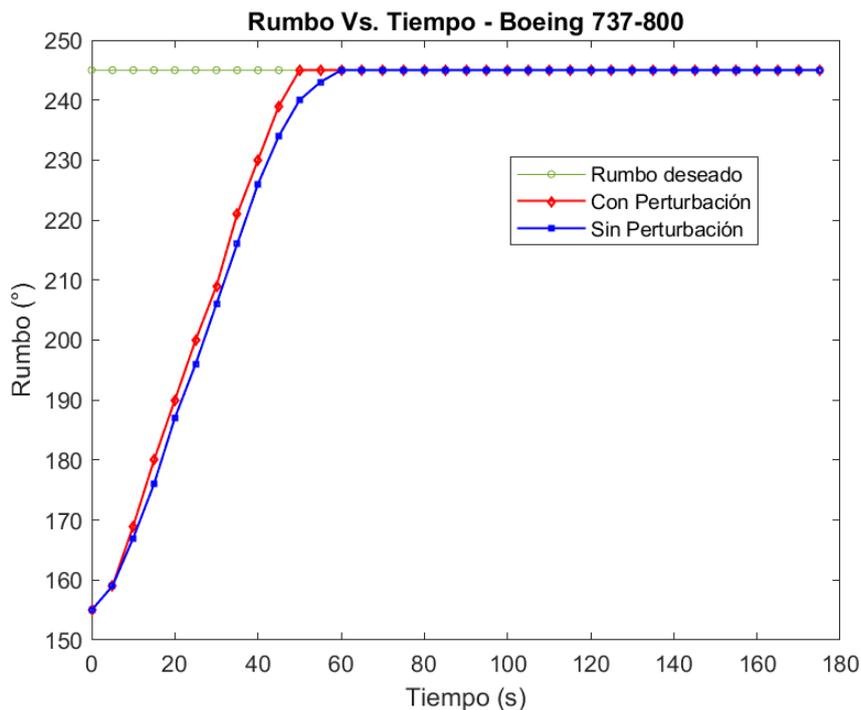


Figura 8. Curva de respuesta de salida de rumbo de la aeronave Boeing 737-800

Fuente: Elaboración propia.

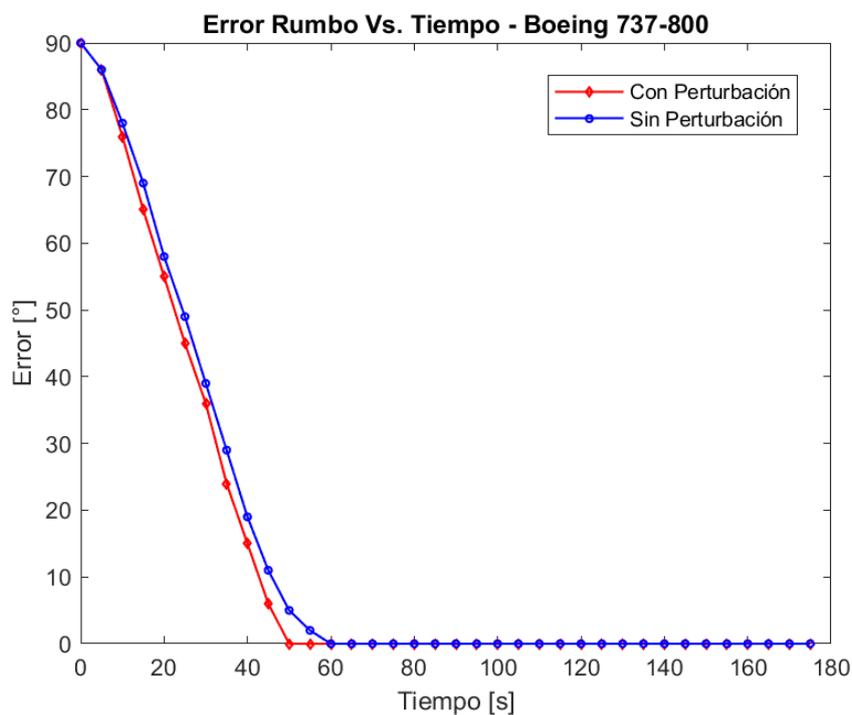


Figura 9. Curva del error de rumbo de la aeronave Boeing 737-800

Fuente: Elaboración propia.

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Cessna 172SP, con perturbación y sin perturbación para el rumbo.

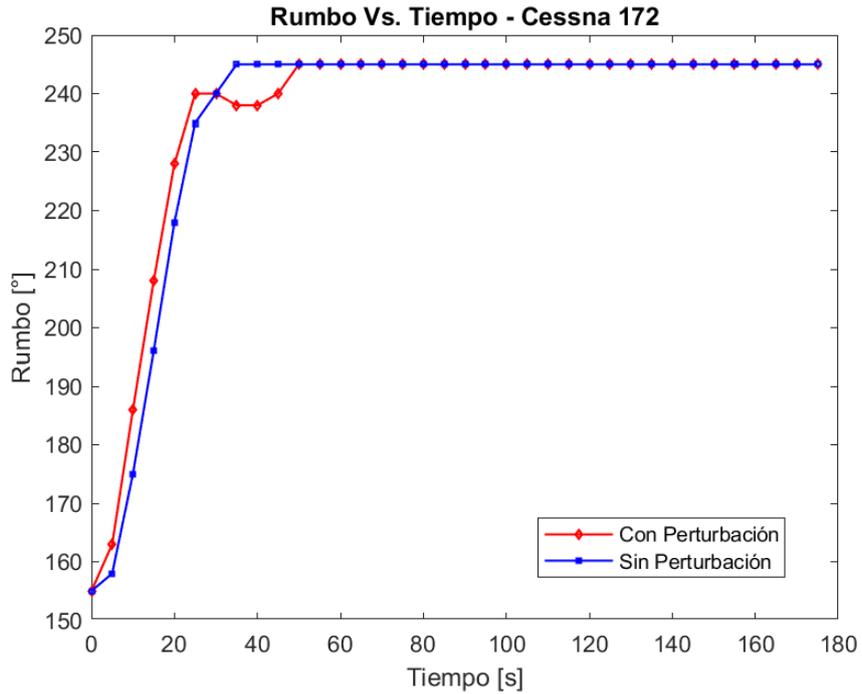


Figura 10. Curva de respuesta de salida de rumbo de la aeronave Cessna 172SP

Fuente: Elaboración propia.

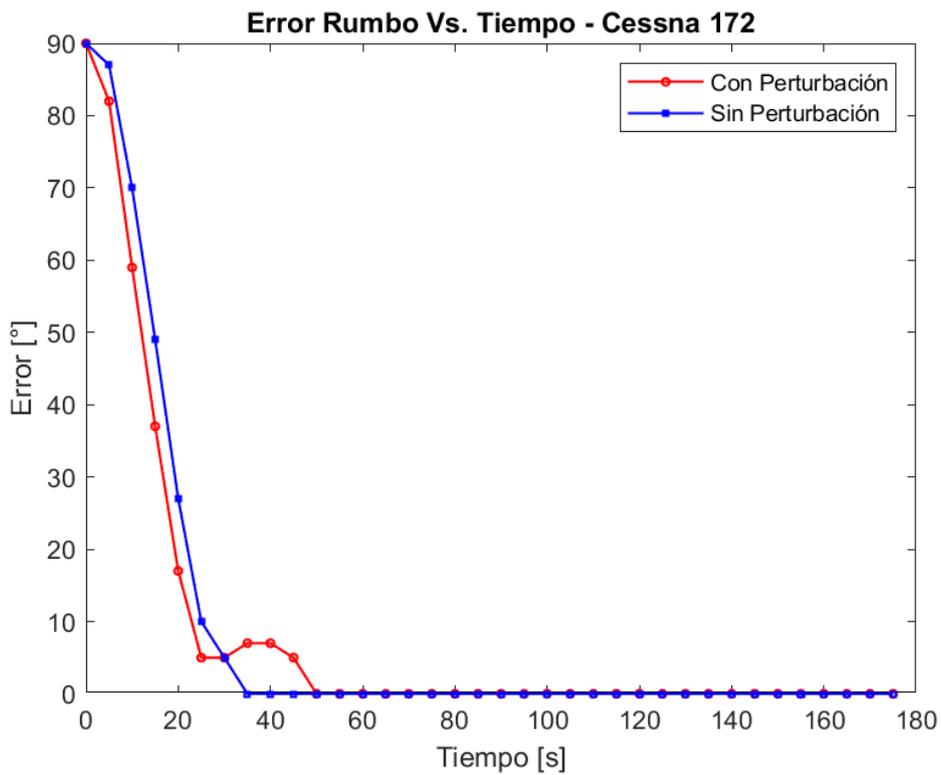


Figura 11. Curva del error de rumbo de la aeronave Cessna 172SP

Fuente: Elaboración propia

- De los datos de rumbo obtenidos de la simulación realizada del vuelo con perturbación de las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP.

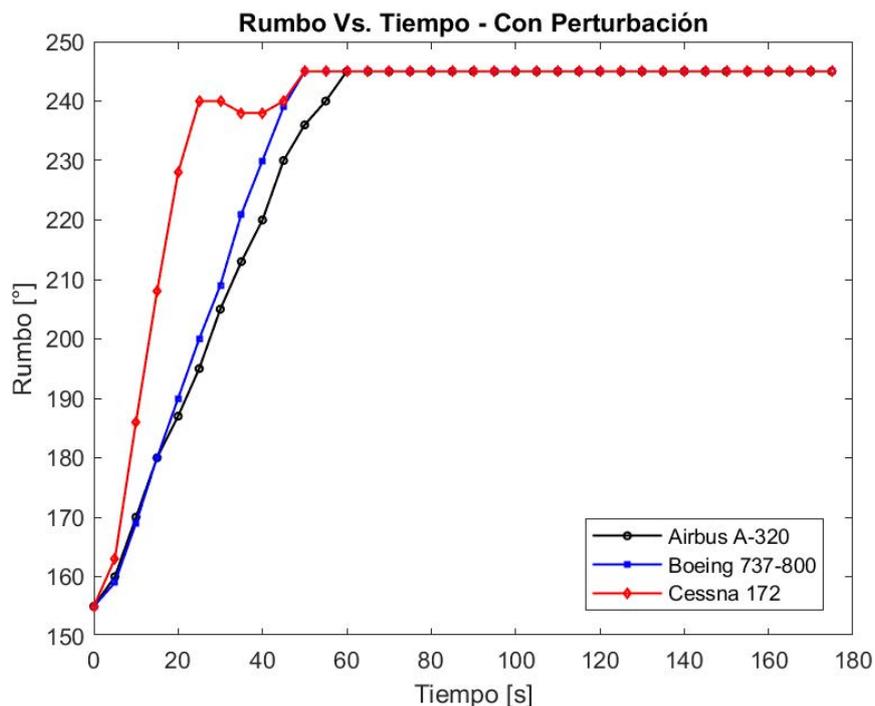


Figura 12. Curva de respuesta de salida de rumbo de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, con perturbación
Fuente: Elaboración propia.

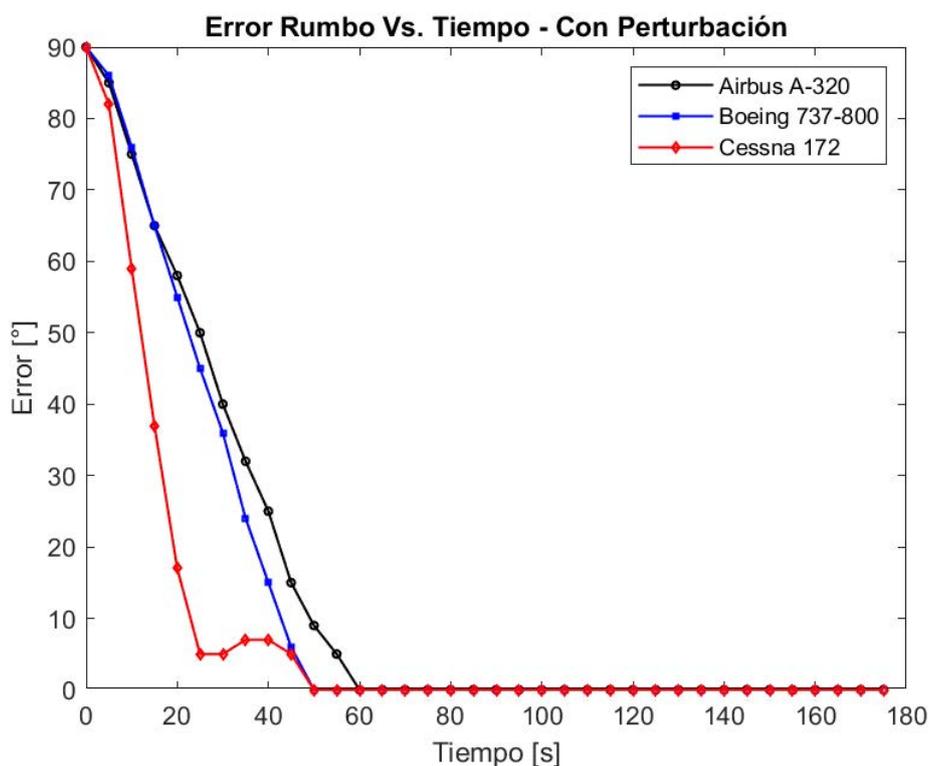


Figura 13. Curva del error de rumbo de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, con perturbación
Fuente: Elaboración propia.

- De las figuras 6, 8 y 10, se realizó el análisis de la respuesta transitoria del sistema de control de rumbo,

obteniéndose los siguientes parámetros de desempeño en un vuelo con perturbación, mostrados en la tabla 3.

Tabla 3
Resultados de respuesta transitoria del sistema de control de rumbo con perturbación

Sistema de control de rumbo con perturbación			
Parámetro	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Sobreelongación máxima (Mp)	0 %	0 %	0 %
Tiempo de retardo (Td)	30 s	25 s	15 s
Tiempo de asentamiento (Ts)	60 s	50 s	50 s
Tiempo de levantamiento (Tr)	30 s	25 s	15 s
Tiempo de pico (Tp o Tmáx)	-	-	-

- De los datos de rumbo obtenidos de la simulación realizada del vuelo sin perturbación de las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172S.

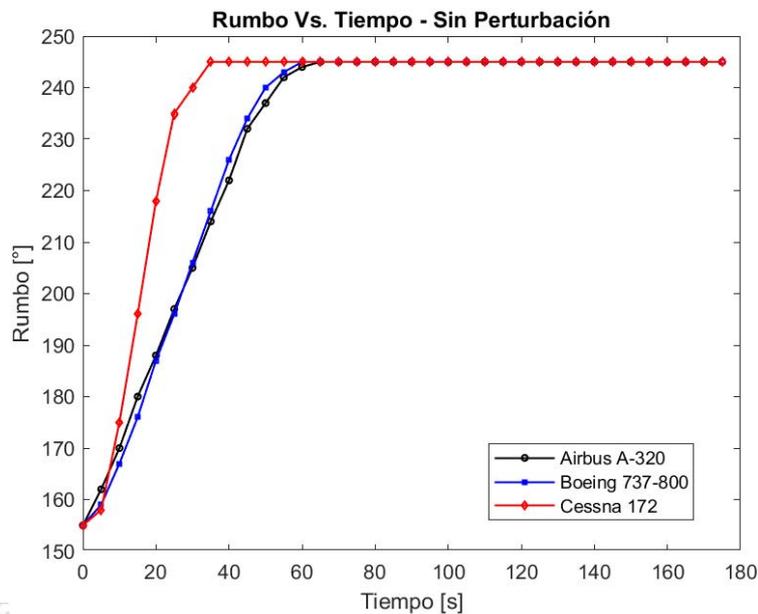


Figura 14. Curva de respuesta de salida de rumbo de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, sin perturbación

Fuente: Elaboración propia.

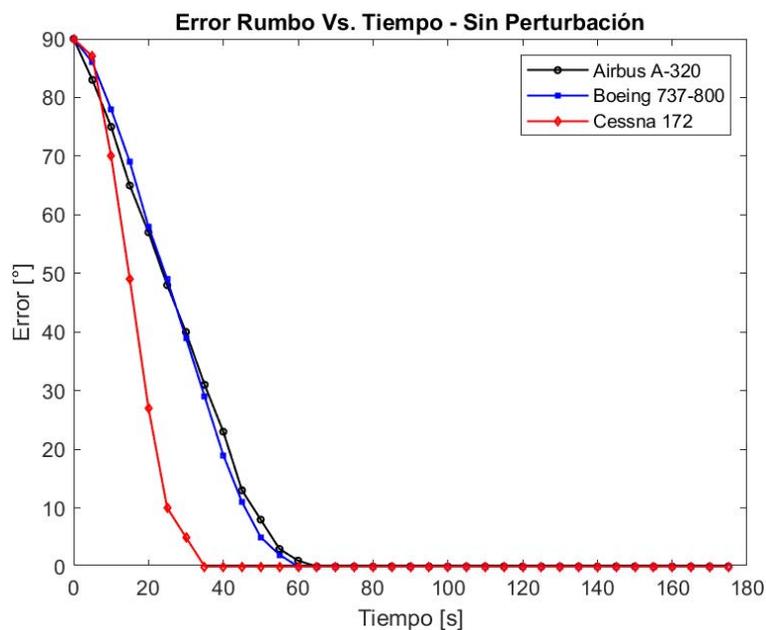


Figura 15. Curva del error de rumbo de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, sin perturbación

Fuente: Elaboración propia.

- De las figuras 6, 8 y 10, se realizó el análisis de la respuesta transitoria del sistema de control de rumbo, y

se obtuvieron los siguientes parámetros de desempeño en un vuelo sin perturbación, mostradas en la tabla 4.

Tabla 4
Resultados de respuesta transitoria del sistema de control de rumbo sin perturbación

Sistema de control de rumbo sin perturbación			
Parámetro	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Sobreelongación máxima (Mp)	0 %	0 %	0 %
Tiempo de retardo (Td)	30 s	30 s	15 s
Tiempo de asentamiento (Ts)	65 s	60 s	35 s
Tiempo de levantamiento (Tr)	30 s	25 s	10 s
Tiempo de pico (Tp o Tmáx)	-	-	-

- De las figuras 7, 9 y 11, se realizó el cálculo del área de la curva del error de rumbo, correspondiente a cada aeronave, mostradas en la tabla 5.

Tabla 5
Áreas de curvas de error del sistema de control de rumbo

Parámetro	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Área de error de rumbo con perturbación (u^2)	2,520	2,265	1,345
Área de error de rumbo sin perturbación (u^2)	2460	2450	1465

B. CURVAS DE DESEMPEÑO DEL CONTROL DE ALTITUD

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Airbus A320, con perturbación y sin perturbación para la altitud.

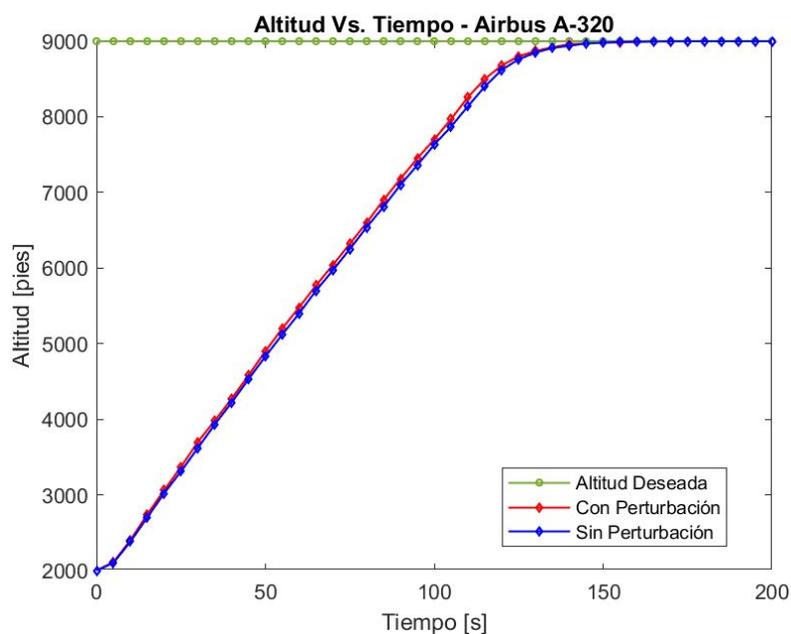


Figura 16. Curva de respuesta de salida de altitud de la aeronave Airbus A320

Fuente: Elaboración propia.

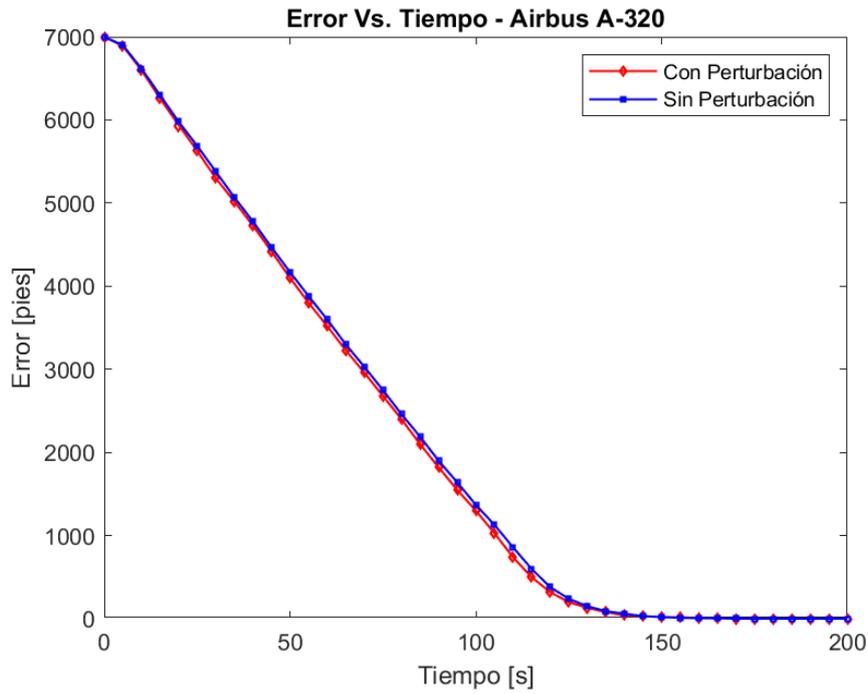


Figura 17. Curva del error de altitud de la aeronave Airbus A320

Fuente: Elaboración propia.

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Boeing 737-800, con perturbación y sin perturbación para la altitud.

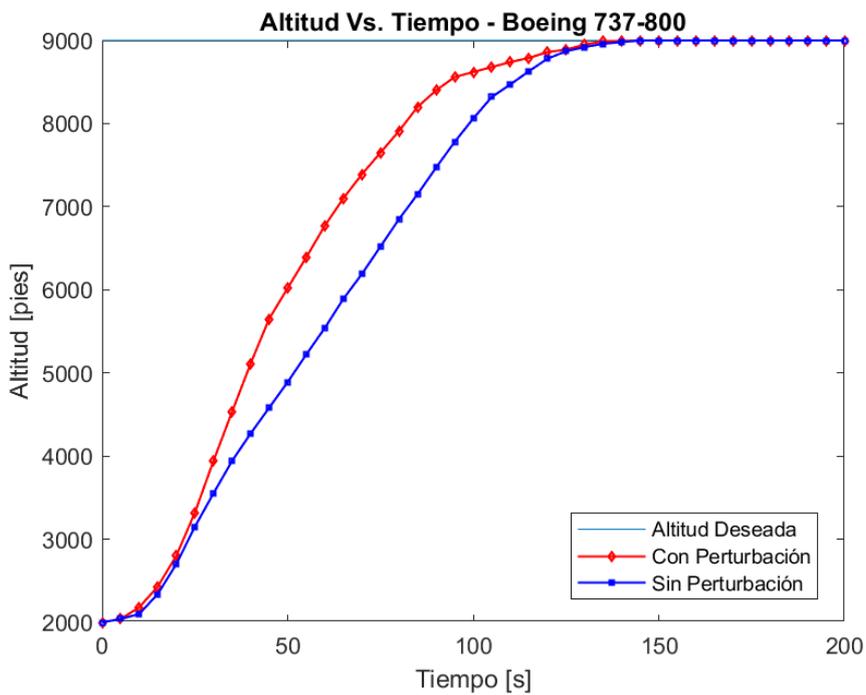


Figura 18. Curva de respuesta de salida de altitud de la aeronave Boeing 737-800

Fuente: Elaboración propia.

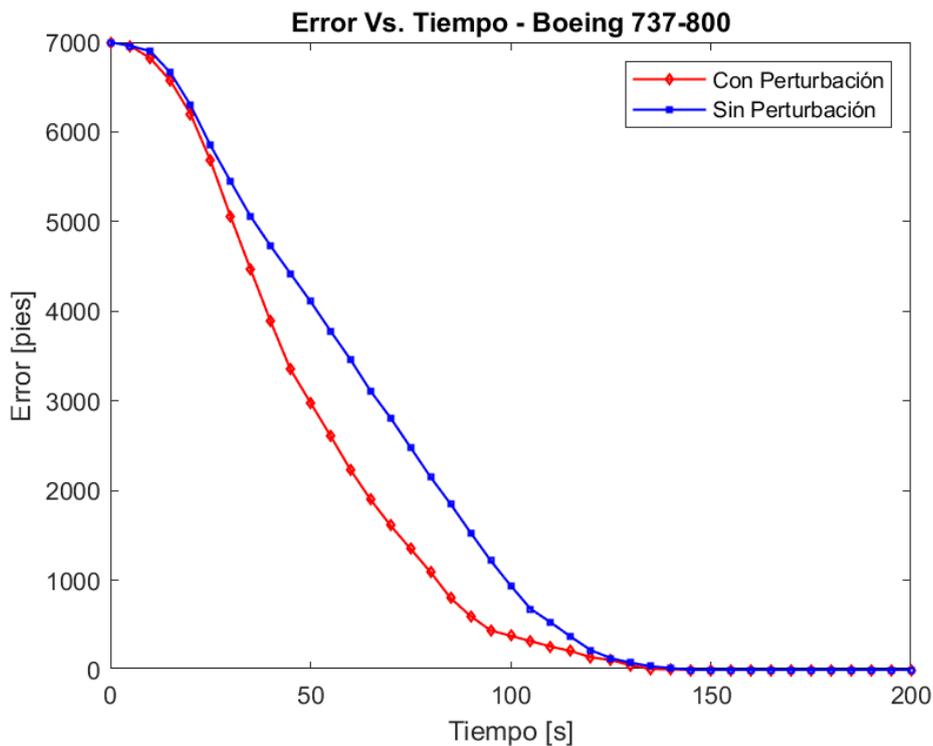


Figura 19. Curva del error de altitud de la aeronave Boeing 737-800

Fuente: Elaboración propia.

- De los datos obtenidos de la simulación realizada del vuelo de una aeronave Cessna 172SP, con perturbación y sin perturbación para la altitud.

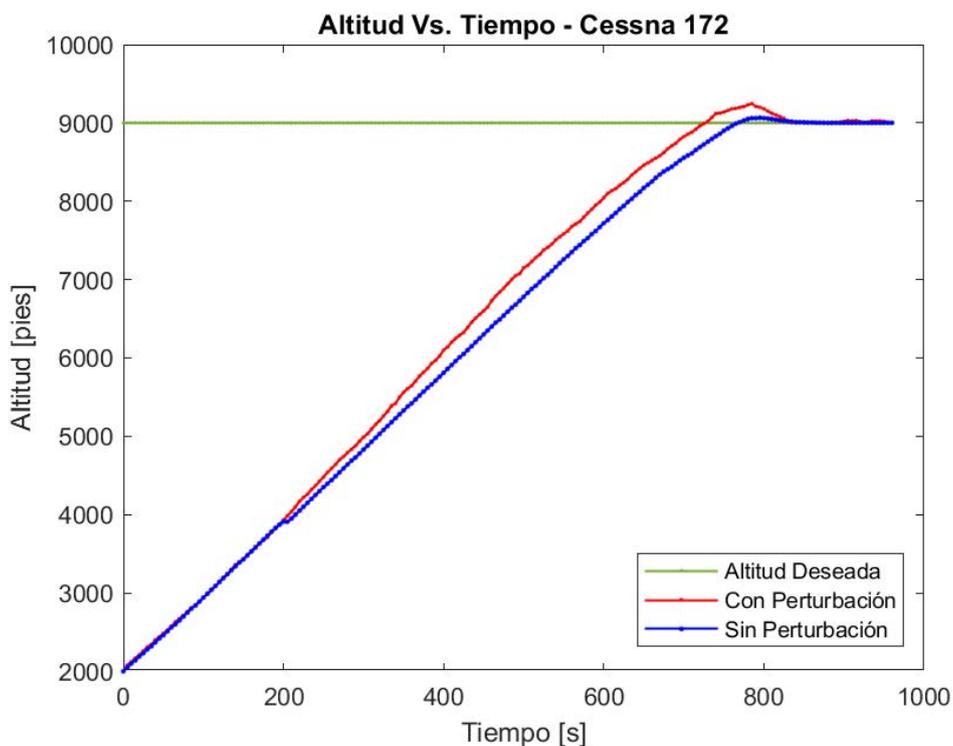


Figura 20. Curva de respuesta de salida de altitud de la aeronave Cessna 172SP

Fuente: Elaboración propia.

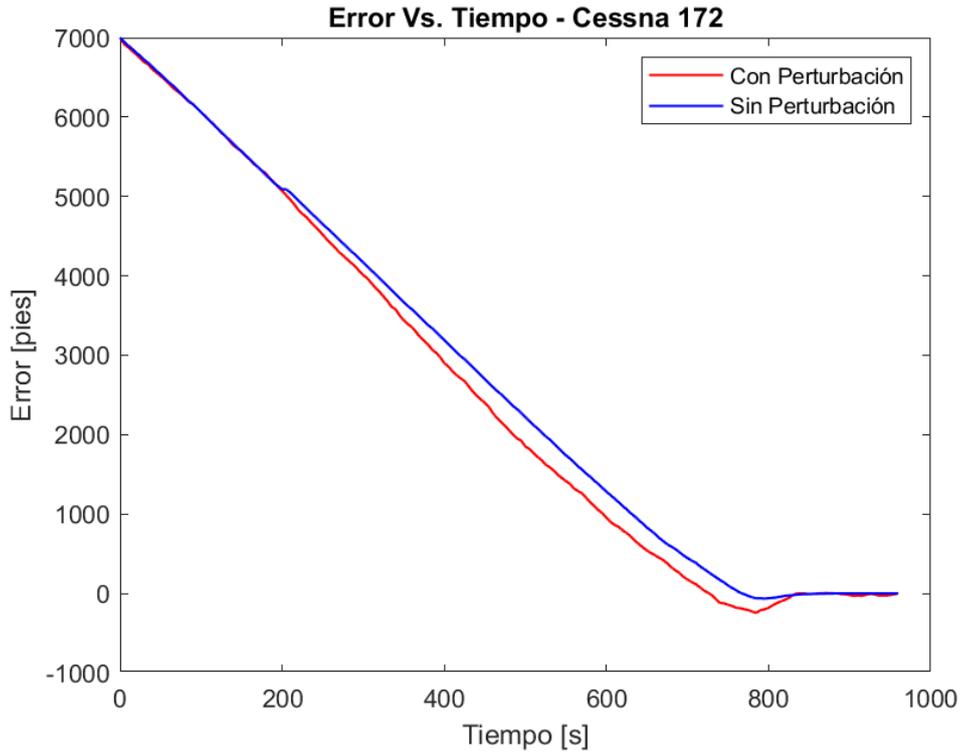


Figura 21. Curva del error de altitud de la aeronave Cessna 172SP

Fuente: Elaboración propia.

- De los datos de altitud obtenidos de la simulación realizada del vuelo con perturbación de las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP.

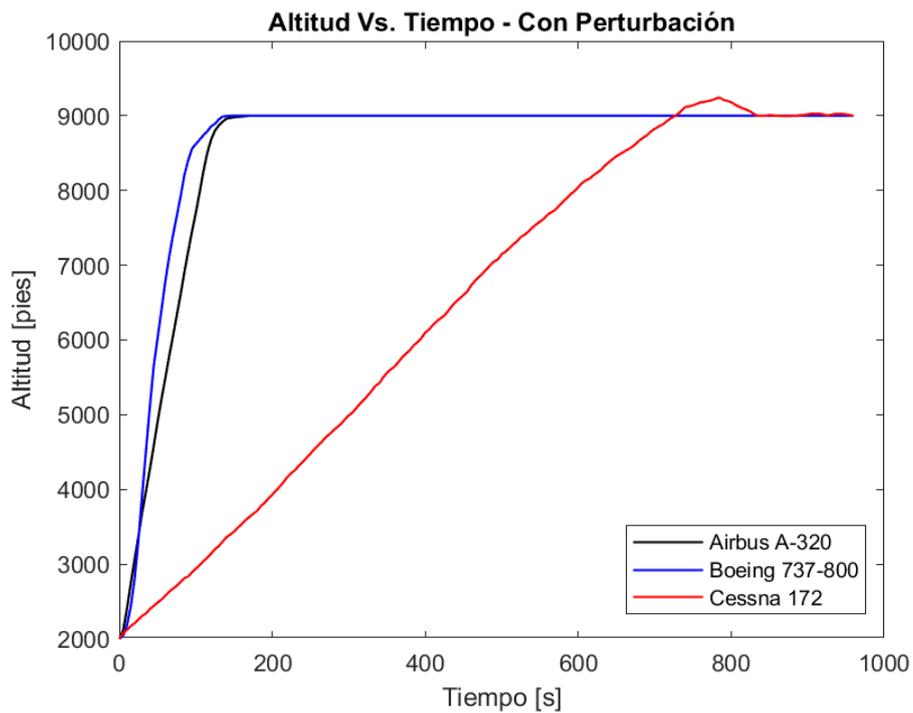


Figura 22. Curva de respuesta de salida de altitud de la aeronave Airbus A320, Boeing 737 -800 y Cessna 172SP, con perturbación

Fuente: Elaboración propia.

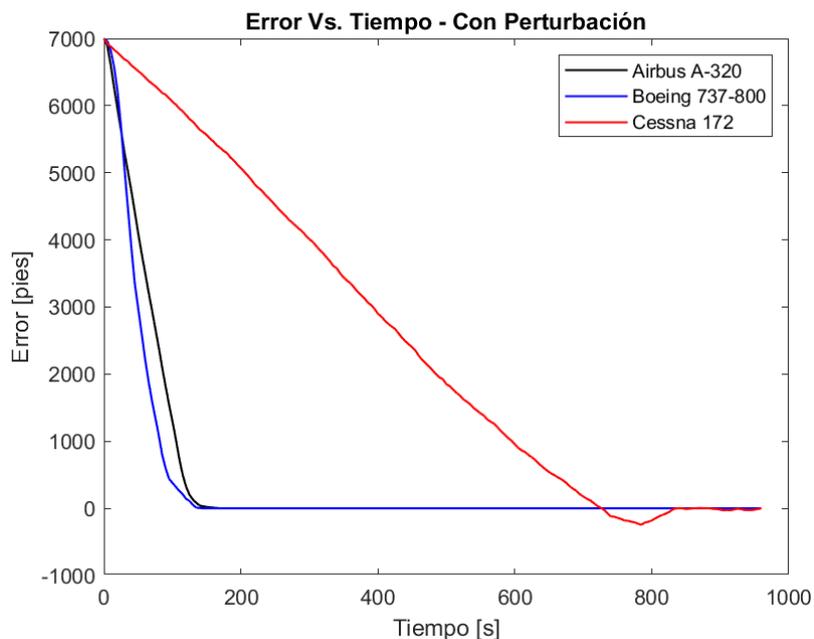


Figura 23. Curva del error de altitud de las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, con perturbación

Fuente: Elaboración propia.

- De las figuras 16, 18 y 20, se realizó el análisis de la respuesta transitoria del sistema de control de altitud, obteniéndose los siguientes parámetros de desempeño en un vuelo con perturbación, mostradas en la tabla 6.

Tabla 6

Resultados de respuesta transitoria del sistema de control de altitud con perturbación

Parámetro	Sistema de control de altitud con perturbación		
	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Sobreeleongación máxima (Mp)	0 %	0 %	2,72 %
Tiempo de retardo (Td)	60 s	43 s	345 s
Tiempo de asentamiento (Ts)	170 s	145 s	885 s
Tiempo de levantamiento (Tr)	105 s	75 s	585 s
Tiempo de pico (Tp o Tmáx)	-	-	785 s

- De los datos de altitud obtenidos de la simulación realizada del vuelo con perturbación de las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP.

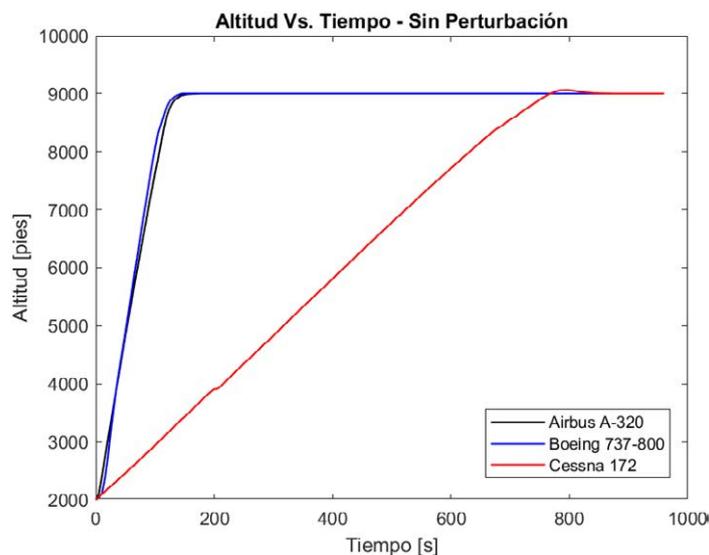


Figura 24. Curva de respuesta de salida de altitud de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, sin perturbación

Fuente: Elaboración propia.

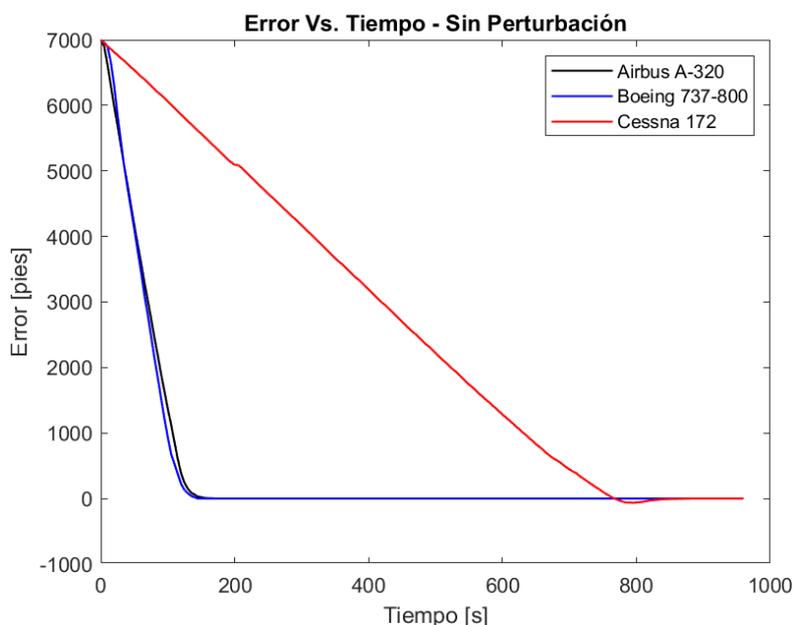


Figura 25. Curva del error de altitud de la aeronave Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, sin perturbación

Fuente: Elaboración propia.

- De las figuras 16, 18 y 20, se realizó el análisis de la respuesta transitoria del sistema de control de altitud, obteniéndose los siguientes parámetros de desempeño en un vuelo sin perturbación, mostradas en la tabla 7.

Tabla 7

Resultados de respuesta transitoria del sistema de control de altitud sin perturbación

Sistema de control de altitud sin perturbación			
Parámetro	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Sobreelongación máxima (Mp)	0 %	0 %	0,72 %
Tiempo de retardo (Td)	60 s	60 s	370 s
Tiempo de asentamiento (Ts)	175 s	145 s	880 s
Tiempo de levantamiento (Tr)	105 s	85 s	620 s
Tiempo de pico (Tp o Tmáx)	-	-	795 s

De las figuras 17, 19 y 21, se realizó el cálculo del área de la curva del error de rumbo, correspondiente a cada aeronave, mostradas en la tabla 8.

Tabla 8

Áreas de curvas de error del sistema de control de altitud

Parámetro	Airbus A320	Boeing 737-800	Cessna 172SP
Área de error de curso con perturbación (pies ²)	434 355	347 975	2 428 460
Área de error de curso sin perturbación (pies ²)	442 810	426 700	2 583 975

CONCLUSIONES

Este estudio ha analizado el rendimiento de los sistemas de control automático de rumbo y altitud en las aeronaves Airbus A320, Boeing 737-800 y Cessna 172SP, utilizando el simulador FSX bajo diversas condiciones de vuelo, tanto con perturbaciones

como sin ellas. A partir de los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El Airbus A320 mostró un mejor rendimiento en vuelos sin perturbaciones, con una efectividad de control del 2,38 %. Sin embargo, en vuelos con perturbaciones, su capacidad de corrección de rumbo fue superada por la del Boeing 737-800.

2. El Boeing 737-800 tuvo un desempeño superior en condiciones perturbadas, con una efectividad de control del 7,55 % en el sistema de rumbo, y destacó también en la corrección de altitud, alcanzando una efectividad del 18,45 %. Además, en escenarios perturbados, su capacidad de corrección de rumbo y altitud fue notablemente más rápida en comparación con la del Airbus A320.
3. En el caso del Cessna 172SP, su sistema de control automático fue más eficiente en condiciones perturbadas, con una efectividad del 8,19 % en el control de rumbo. No obstante, su control de altitud presentó inestabilidad, con una sobreelongación del 2,72 % en vuelos perturbados, lo que indica una menor sintonización en comparación con las aeronaves comerciales.
4. Ninguna de las aeronaves mostró sobreelongación en el sistema de control de rumbo, lo que sugiere una correcta sintonización de los sistemas automáticos, asegurando una corrección suave y controlada hacia el rumbo deseado, especialmente en las aeronaves comerciales Airbus y Boeing.
5. En términos de tiempo de asentamiento y tiempo de levantamiento, el Boeing 737-800 mostró un desempeño superior al del Airbus A320, con una efectividad de control ligeramente mayor (0,41 %). En vuelos sin perturbaciones, el Cessna 172SP mejoró su tiempo de asentamiento en comparación con el Boeing, aunque sus tiempos de levantamiento y corrección fueron más prolongados debido a diferencias en aerodinámica y rendimiento.
6. El simulador FSX ha demostrado ser una herramienta adecuada para analizar el comportamiento de los sistemas de control automático en diferentes aeronaves. Las respuestas transitorias y la señal de error obtenidas a través de las simulaciones reflejan dinámicas específicas según el tipo de aeronave, validando el uso de la función de transferencia en los controladores automáticos.

Las conclusiones sugieren que la efectividad de los sistemas de control automático varía significativamente según la aeronave y las condiciones de vuelo, siendo el Boeing 737-800 el que demuestra un rendimiento más consistente en escenarios con perturbaciones. Asimismo, el simulador FSX proporciona una base adecuada para el análisis de las respuestas dinámicas de las aeronaves; sin embargo, se recomienda realizar estudios complementarios en simuladores de mayor precisión para corroborar los resultados en condiciones reales de vuelo.

REFERENCIAS

- [1] Anderson, B. (2021). *Flight safety and aircraft control systems*. Aviation Safety Press.
- [2] Brown, J. & Green, T. (2020). *Flight simulation: An integrated approach*. CRC Press.
- [3] Federal Aviation Administration. (1991). *Airplane simulator qualification AC-120-40B*.
- [4] García, J. & Martínez, L. (2021). *Control systems engineering in aviation*. Elsevier.
- [5] Harris, J. & Clarke, M. (2020). *Advanced flight simulation and control systems*. Aerospace Press.
- [6] Johnson, R. & Lee, M. (2019). *Aeronautical control systems: Concepts and applications*. Wiley.
- [7] Johnson, R. & Lee, T. (2019). *Dynamic systems analysis in flight simulators*. Engineering Science Publications.
- [8] Kramer, S. & Anderson, R. (2019). *Simulation techniques for aircraft performance evaluation*. Aviation Books.
- [9] Miller, D. & White, H. (2019). *Adaptive and robust control in aviation*. Wiley.
- [10] Nguyen, P. & Kim, Y. (2020). *Aircraft stability and control in simulated environments*. Flight Dynamics Publishing.
- [11] Ogata, K. (2020). *Modern control engineering*. Pearson.
- [12] Sage, A. & White, D. (2021). *Introduction to flight simulation and control*. Modern Aviation Publishing.
- [13] Smith, A. & Jones, B. (2021). *Advances in flight simulation technologies*. Springer.
- [14] Smith, L. & Brown, J. (2021). *Practical aspects of flight simulator systems*. Engineering Review.
- [15] Stevens, L. & Lewis, L. (2020). *Aircraft control and simulation*. Wiley.

ACERCA DE LOS AUTORES

Teódulo Severino Castillo Arce

Coordinador del Departamento de Mecánica y Aviación en Tecsup, técnico aeronáutico con especialización en el extranjero en técnicas de comunicación digital de sistemas de aeronaves y en fabricación de aeronaves de instrucción. Ha participado en el programa de coproducción de aeronaves de instrucción KT1-P con CIA KAI (Corea del Sur) y en la modernización de aeronaves en SEMAN-FAP, además de contar con certificación de CIA Rohde & Schwarz (Alemania). Es bachiller en Educación por la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. Posee licencia DGAC en Célula, Motor Propulsor y Aviónica. Ha sido profesor invitado en la UNAQ por la Alianza del Pacífico y ha recibido el Premio a la Calidad e Innovación FAP, así como el Premio a la Innovación Docente en Tecsup.

@ tcastillo@tecsup.edu.pe

Ricardo Wilber Ccoyure Tito

Docente del Departamento de Mecánica y Aviación en Tecsup, bachiller en Ingeniería Aeronáutica por la Universidad Tecnológica del Perú (UTP). Realizó estudios técnicos de mantenimiento de aeronaves en la Escola de Especialistas de Aeronáutica en Guaratinguetá, Brasil, y en la Escuela de Aviación Militar de Krasnodar en la República Federal de Rusia, donde se especializó en mantenimiento de aeronaves y motores. Técnico aeronáutico con amplia experiencia en el mantenimiento de aeronaves comerciales y militares, además de instructor técnico en esta área. Posee licencia DGAC en Célula, Motopropulsor y Aviónica.

 rccoynure@tecsup.edu.pe

Recibido: 30-04-24
Revisado: 07-10-24
Aceptado: 17-10-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Aplicación de FOG, una herramienta
**open-source para la
clonación de sistemas
operativos, en conjunto
con Dell Command
Configure Wizard,
Faronics DeepFreeze
Cloud o PSEXEC.**



Optimización de reinstalación de *software* en laboratorios de cómputo académicos de un instituto superior mediante clonación automatizada

Optimization of Software Reinstallation in Academic Computer Labs of a Higher Education Institution through Automated Cloning

RESUMEN

En un entorno educativo en constante evolución, el área de Tecnologías de la Información (TI) se ha convertido en un componente estratégico. La creciente importancia de proporcionar un sólido soporte tecnológico a los estudiantes, especialmente en el uso de computadoras en laboratorios, destaca la necesidad de una gestión eficiente de los equipos. Sin embargo, en este contexto dinámico, la gestión efectiva de cada equipo se vuelve cada vez más desafiante.

Este estudio tiene como objetivo demostrar la optimización del proceso de reinstalación de *software* en los laboratorios de cómputo de un instituto superior mediante la implementación de una solución de clonación automatizada. El estudio se centra en la aplicación de FOG, una herramienta *open-source* para la clonación de sistemas operativos, en conjunto con Dell Command Configure Wizard, Faronics Deep Freeze Cloud o PSEXEC. Estas herramientas permiten automatizar casi por completo la reinstalación de *software* y configuración en los equipos, asegurando una gestión eficiente y sin interrupciones del servicio.

La metodología empleada consiste en la utilización conjunta de estas herramientas, permitiendo reinstalar todas las computadoras del laboratorio de cómputo a partir de la creación de una imagen de una computadora preconfigurada (Host imagen), la cual se despliega en los equipos host clientes. Este proceso se realiza sin interrupciones del servicio, ya que el proceso automatizado se ejecuta fuera del horario de uso de los equipos.

En consecuencia, se observan los ahorros notables de tiempo y costos, ocasionando una mejora significativa del rendimiento de los equipos de los laboratorios y proporcionando una mejor experiencia de uso para los usuarios finales.

ABSTRACT

In a constantly evolving educational environment, the Information Technology (IT) area has become a strategic component. The growing importance of providing robust technological support to students, particularly in the use of computers in laboratories, underscores the need for efficient equipment management. However, in this dynamic context, effectively managing each device becomes increasingly challenging.

This study aims to demonstrate the optimization of the software reinstallation process in the computer labs of a higher education institution by implementing an automated cloning solution. The study focuses on the application of FOG, an open-source tool for operating system cloning, combined with Dell Command Configure Wizard, Faronics Deep Freeze Cloud, or PSEXEC. These tools enable the near-complete automation of software reinstallation and configuration on devices, ensuring efficient management and uninterrupted service.

The methodology involves the combined use of these tools, allowing the reinstallation of all computers in the lab by creating an image of a preconfigured computer (host image), which is then deployed to client host devices. This process is carried out without service interruptions, as the automated process is executed outside the operational hours of the equipment.

As a result, notable time and cost savings are observed, leading to a significant improvement in the performance of the laboratory equipment and providing a better user experience for end-users.



Palabras Claves

Clonación, reinstalación de *software*, laboratorios de cómputo, *open source*, *host* cliente, *host* imagen.

Key words

Cloning, *software* reinstallation, computer labs, *open source*, *client* host, *image* host.

INTRODUCCIÓN

En instituciones educativas, como institutos y universidades, así como en organizaciones y empresas en general, la gestión eficiente de equipos informáticos es un desafío considerable. Con el creciente número de computadoras en estos entornos, se vuelve crucial mantener y actualizar los sistemas de manera eficaz y económica. En particular, el mantenimiento de equipos de cómputo en laboratorios con numerosos dispositivos es un proceso crítico. Uno de los mayores desafíos es preservar el rendimiento óptimo del sistema operativo Microsoft Windows, que tiende a corromperse con el uso por diversas causas, como actualizaciones fallidas, controladores corruptos, claves de registro, archivos temporales, disco fragmentado, *software* malicioso y la instalación y desinstalación de programas. Sin un mantenimiento adecuado, el rendimiento de los equipos se deteriora, lo que afecta la experiencia de los usuarios y la eficiencia de los laboratorios.

El problema general radica en la incapacidad de muchas instituciones educativas para gestionar de manera eficiente y económica la clonación y el despliegue de sistemas operativos en un gran número de computadoras. Las soluciones comerciales disponibles para estos procesos suelen ser costosas, lo que ejerce una presión adicional sobre los presupuestos educativos, ya de por sí limitados. Además, la administración manual de cada equipo es un proceso laborioso y consume tiempo, lo que dificulta la actualización y el mantenimiento periódico necesarios para asegurar que todos los sistemas funcionen de manera óptima y de forma homogénea.

El problema investigado en este estudio es la optimización del proceso de reinstalación de *software* en los laboratorios de cómputo de un instituto superior mediante la automatización de las tareas involucradas. La investigación se enfoca en demostrar cómo la implementación de herramientas como FOG, Dell Command Configure Wizard, Faronics Deep Freeze Cloud y PSEXEC permite realizar de manera eficiente y rentable la clonación y el despliegue masivo de sistemas operativos. Estas herramientas facilitan la automatización casi total del mantenimiento de *software*, lo que asegura una gestión más eficiente de los equipos sin interrupciones en el servicio.

El objetivo del estudio es demostrar la optimización del proceso de reinstalación de *software* en múltiples computadoras mediante un sistema de clonación eficiente y rentable, optimizando el uso de los recursos disponibles, reduciendo costos y tiempos. Entre los objetivos específicos se incluyen los siguientes: diseñar un proceso de clonación eficaz, configurar y adquirir el *hardware* necesario de manera económica, ejecutar el proceso de forma eficiente y evaluar la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto. Además, el estudio busca demostrar cómo la implementación de herramientas como FOG, Dell Command Configure Wizard, Faronics Deep Freeze Cloud y PSEXEC puede mejorar significativamente el mantenimiento y la gestión de equipos en laboratorios de cómputo. También se pretende identificar posibles mejoras y expansiones para aumentar la eficacia y adaptabilidad del proyecto en diferentes contextos y necesidades futuras.

FUNDAMENTOS

Váldez [3], en su proyecto, demuestra la eficiencia operativa alcanzada mediante la integración de FOG como herramienta central, lo que permitió mejoras significativas en la velocidad y precisión del proceso de clonación. La decisión estratégica de reutilizar un *router* Gigabit optimizó la transferencia de datos, facilitando la clonación simultánea y reduciendo los tiempos de ejecución del proyecto. Este enfoque no solo garantiza un costo efectivo y sostenible, sino que también sienta las bases para futuras implementaciones escalables y la exploración de técnicas avanzadas de clonación remota.

Capablo [2], en su trabajo, presenta un sistema innovador diseñado para abordar los desafíos de gestión de imágenes de sistemas operativos en redes locales (LAN). Este proyecto se enfoca en ofrecer una solución eficiente, económica y robusta para restaurar y mantener imágenes de sistemas operativos en múltiples computadoras dentro de una red.

En la revista *Tecnología e Innovación Educativa*, el Banco Mundial menciona el aprendizaje personalizado, destacando que la tecnología educativa debe diseñarse para responder a las necesidades de los estudiantes y ofrecer oportunidades de aprendizaje de calidad tanto en las escuelas como en los hogares [1].

METODOLOGÍA

El proceso de clonación consiste en instalar y configurar todo el *software* necesario en un único equipo, que servirá como imagen base para clonar otros equipos. Este procedimiento reduce significativamente el tiempo requerido para reinstalar el sistema en múltiples estaciones de trabajo, aunque presenta algunas limitaciones, como la necesidad de intervención manual en cada equipo.

El uso de herramientas como Clonezilla Live supera la limitación de clonar un equipo a la vez, permitiendo la clonación simultánea de varios equipos mediante comunicación *multicast*. Sin embargo, en cada clonación es necesario configurar las opciones UEFI (o BIOS) para el arranque desde PXE, además de realizar otras configuraciones posteriores, como el nombre del *host* y la dirección IP.

Este estudio demuestra cómo es posible maximizar la eficiencia del proceso de clonación utilizando Fog Project, una aplicación que no solo permite clonar, sino también gestionar la administración de imágenes de disco y su despliegue en equipos conectados a la red. Complementando FOG, se emplean herramientas como Faronics Deep Freeze o PSEXEC para programar tareas previas a la clonación, y la utilidad Dell Command Configure Wizard para configurar de manera remota la UEFI de los equipos DELL. Este conjunto de herramientas define un proceso de clonación automatizado para la reinstalación del *software*.

A continuación, se detallan las configuraciones y requisitos previos a la clonación:

- Tener una red con un servidor DHCP para la asignación dinámica de direcciones IP.

- Los equipos cliente deben ser el mismo modelo, en este caso se despliegan las imágenes de disco de la marca DELL.
- Cada laboratorio de equipos de cómputo debe contar con su propia VLAN y direccionamiento IP.
- El servidor FOG está instalado en un equipo virtual con sistema operativo Ubuntu.
- Las imágenes de disco tienen una capacidad promedio de 100 GB.
- Habilitación del tráfico *multicast* en los equipos de comunicaciones.
- Configuración del servidor DHCP para soportar el arranque PXE.
- Instalación de la aplicación Dell Command Configure Wizard.
- Instalación y operación del cliente de Faronics Deep Freeze Cloud o PSEXEC en los equipos cliente.
- Registro de los equipos cliente en el servidor FOG, asignándoles nombres únicos.
- Tener el equipo imagen con todo el *software* base y especializado necesario en un equipo para crear la imagen base en el servidor FOG.

El proceso de clonación se divide en tres etapas:

A. Preclonación

- Generación de un archivo de configuración con Dell Command Configure Wizard para programar el encendido automático de los equipos.
- Distribución y ejecución remota del archivo de programación de encendido y configuración de arranque PXE mediante Deep Freeze o PSEXEC.
- Programación de la tarea de clonación *multicast* en el servidor FOG para todos los equipos del laboratorio.

El tiempo estimado en el proceso de preclonación dura un poco menos de dos horas.

B. Clonación

- Los equipos se encienden automáticamente según la programación remota.
- Los equipos clientes inician el arranque PXE y se conectan al servidor FOG.
- Los clientes se unen a la sesión *multicast* para empezar el proceso de clonación.
- Las velocidades de transferencia de datos durante la clonación oscilan entre 12 GB/min y 16 GB/min.
- Terminada la clonación, los equipos se reinician y arrancan desde la unidad interna de almacenamiento.

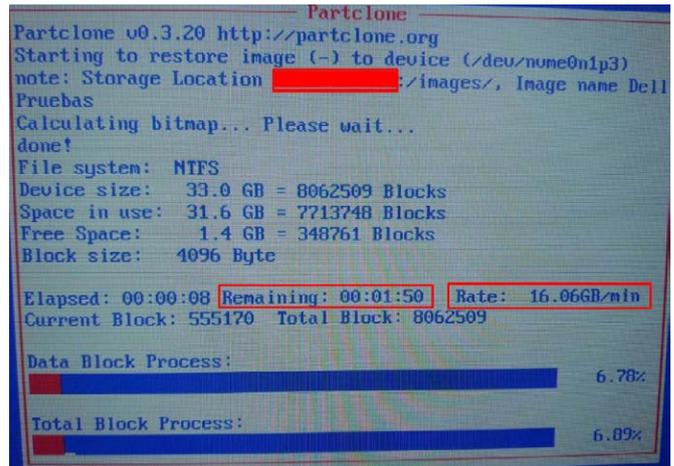


Figura 1. Detalles del tiempo y velocidad estimada en el proceso del despliegue de imagen con FOG

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Despliegue de imagen *multicast* en 24 computadoras (*Host Clients*) en uno de los laboratorios del instituto Tecsup, en el proceso de clonación

Fuente: Elaboración propia.

El proceso del despliegue de imagen en las 24 computadoras toma un tiempo estimado de entre 2 y 3 minutos.

C. Posclonación

En esta etapa, para el caso particular de Tecsup, no es necesaria la intervención de personal, ya que la configuración final del sistema operativo y de algunas aplicaciones se automatiza mediante

scripts incluidos en la imagen base. Solo se requiere una revisión final para asegurar que todo se haya completado correctamente. Este proceso garantiza una reinstalación eficiente y automatizada, minimizando la intervención manual y maximizando la eficiencia en la gestión de los laboratorios de cómputo.

El tiempo total aproximado para todos los procesos de clonación es de dos horas.

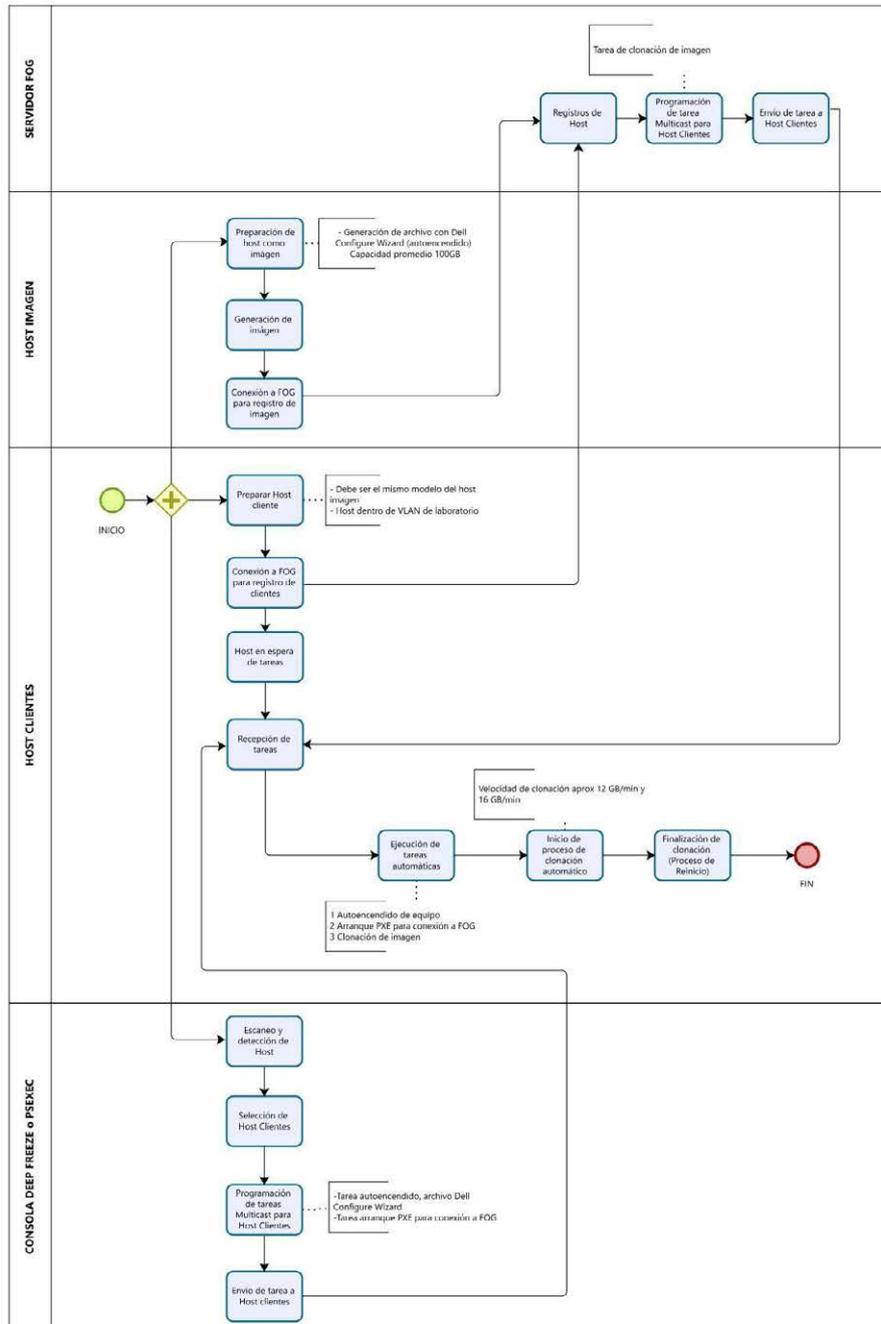


Figura 3. Diagrama de flujo en relación con el proceso de clonación visto desde los equipos Host (imagen y cliente) y herramientas de automatización

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

El estudio demuestra la optimización del proceso de reinstalación de *software* en los laboratorios de cómputo de un instituto mediante una solución de clonación automatizada. Para esta evaluación, se registraron los tiempos de instalación en laboratorios con 24 computadoras cada uno, en la institución. Los resultados se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 1

Costos por tipo de herramienta usada para la automatización de clonación, donde se toma como ejemplo el PESEXEC que es gratuito en vez de Deep Freeze debido a que es licenciado y el costo aprox. por equipo es \$10,00

Herramienta de automatización	Costo
FOG	S/0,00
Herramienta Dell Command Configure Wizard	S/0,00
PSEXEC	S/0,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Cálculo de tiempo ahorrado por laboratorio entre el método tradicional y el método automatizado, (considerando que el tiempo de reinstalación por equipo en el método tradicional es de 3 horas)

Método	Cantidad de equipos por laboratorio	Tiempo de reinstalación (horas)	Tiempo ahorrado (horas)	Porcentaje de tiempo ahorrado
Método tradicional	24	72	0	0 %
Método automatizado	24	2	70	97,22 %

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 2 compara los tiempos de reinstalación de *software* entre el método tradicional y el automatizado. Los datos muestran que el método automatizado reduce drásticamente el tiempo del proceso y ofrece un ahorro del 97,22 % en comparación con

el método tradicional. Mientras el método tradicional requiere 72 horas por laboratorio, el automatizado reduce este tiempo a solo dos horas, lo que evidencia una mejora significativa en la eficiencia.

Tabla 3

Cálculo de ahorro en soles por laboratorio, considerando el caso de una persona con salario mínimo por mes en Perú trabajando ocho horas diarias

Concepto	Resultado
Salario	S/1025 x mes S/34,17 x día S/4,27 x hora
Horas ahorradas por laboratorio «según tabla 2»	70 horas
Monto ahorrado por laboratorio	S/4,27 x 70 = S/298,90

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 muestra el ahorro económico por laboratorio al usar el método automatizado de reinstalación de *software*. Con base en el salario mínimo en Perú, de S/1025 mensuales o S/4,27 por hora, el ahorro estimado por laboratorio es de S/298,90. Este

ahorro proviene de la reducción de 70 horas en el tiempo de reinstalación, lo que implica una significativa disminución en los costos laborales.

Tabla 4
Proyección del ahorro económico en soles acumulado a lo largo de tres años

Tiempo en años	Cantidad de reinstalaciones al año	Cantidad de laboratorios	Monto ahorrado por laboratorio	Monto ahorrado en el tiempo
1	2	26	S/298,90	S/15 542,80
2	2	26	S/298,90	S/31 085,60
3	2	26	S/298,90	S/46 628,40

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 4 proyecta el ahorro económico acumulado en soles a lo largo de varios años. Basada en dos reinstalaciones anuales en 26 laboratorios, el ahorro total se estima en S/15 542,80 en el primer año, S/31 085,60 en el segundo y S/46 628,40 en el tercero. Esta proyección demuestra el beneficio económico sostenido del método automatizado, resaltando su eficacia en generar ahorros significativos a lo largo del tiempo.

crece el número de laboratorios y el alumnado, destaca la capacidad del método para generar ahorros significativos a lo largo del tiempo. Esto no solo respalda su uso continuo, sino que también enfatiza su efectividad y su papel clave en el crecimiento y mejora constante de la institución.

CONCLUSIONES

- El estudio demuestra que la implementación de una solución de clonación automatizada optimiza significativamente el proceso de reinstalación de *software* en los laboratorios de cómputo de un instituto superior. Con herramientas como FOG, Dell Command Configure Wizard, Faronics Deep Freeze Cloud y PSEXEC, hemos logrado una reinstalación estandarizada y eficiente que minimiza la intervención manual y asegura una gestión fluida del servicio.
- La implementación del método automatizado para la reinstalación de *software* ha permitido reducir drásticamente el tiempo necesario para completar el proceso, disminuyendo el tiempo de reinstalación de 72 horas en el método tradicional a solo 2 horas con el automatizado. Esta notable mejora representa un ahorro del 97,22 % en comparación con el método convencional, evidenciando una mejora significativa en la eficiencia del proceso.
- La implementación del sistema automatizado para la reinstalación de *software* no solo ha demostrado ser altamente eficiente al reducir el tiempo, sino que también se traduce en un ahorro económico de S/298,90 por laboratorio de 24 computadoras, basado en el salario mínimo en Perú. Si el salario aumenta, el ahorro económico también crecerá, ya que el personal de TI, además de realizar reinstalaciones, lleva a cabo otras tareas importantes. Este ahorro resalta la ventaja de adoptar soluciones automatizadas, que no solo optimizan la eficiencia, sino que también reducen costos.
- La proyección del ahorro económico acumulado a lo largo de los años revela el impacto positivo del método automatizado de reinstalación de *software*. Basado en dos reinstalaciones anuales en 26 laboratorios, el ahorro total estimado es de S/15 542,80 en el primer año. Este ahorro aumenta a S/ 31 085,60 en el segundo año y llega a S/46 628,40 en el tercer año. Este crecimiento progresivo en el ahorro, a medida que

- La automatización en la reinstalación de *software* ha transformado la gestión de los laboratorios al permitir la programación y ejecución remota de tareas, eliminando la necesidad de presencia física y optimizando el rendimiento del laboratorio. Esta metodología no solo evita problemas comunes como la fragmentación de discos y los archivos corruptos, mejorando la experiencia de uso para estudiantes y usuarios finales, sino que también demuestra ser una solución robusta para la optimización de procesos. Además, su efectividad en el contexto de los laboratorios del instituto superior resalta su versatilidad y potencial para ser adaptada y escalada en organizaciones y empresas, ofreciendo una solución eficiente y flexible para la clonación y configuración de equipos en diversos entornos.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial (2020). *Reimaginar las conexiones entre las personas: Tecnología e Innovación Educativa en el Banco Mundial*. Banco Mundial. <https://documentos.bancomundial.org/es/publication/documents-reports/documentdetail/817181617183053785/reimagining-human-connections-technology-and-innovation-in-education-at-the-world-bank>
- [2] Capablo, A. (2015). *FOG – Una solución código libre para clonar PCs*. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/78427?show=full>
- [3] Vázquez, O. (2024). *Creación a bajo coste de un sistema de clonación masivo* [Trabajo final de grado]. Universidad Abierta de Cataluña (UOC). <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/149509?locale=es>

ACERCA DEL AUTOR

Luis Angel Portocarrero Pinto

Técnico en Redes y Comunicaciones de Datos. Con más de veinte años de experiencia en soporte de Tecnología de la Información en administración de servidores, administración de equipos de comunicaciones, soporte de *hardware* y *software*, diseño e implementación de proyectos de cableado estructurado. Cuatro años de experiencia docente en Tecsup.

 lportocarrero@tecsup.edu.pe

María Fernanda Condori

Ingeniera industrial y técnica en Redes y Comunicaciones de Datos, con nueve años de experiencia en soporte técnico, así como en el levantamiento y la gestión de inventarios en los sectores educativo, minero y de telecomunicaciones.

Con trayectoria profesional centrada en la gestión, documentación y organización de activos tecnológicos, así como la configuración e instalación de *hardware* y *software*, desempeñando un papel crucial en la migración de equipos informáticos y brindando soluciones efectivas como analista de mesa de servicio de TI.

 mcondorim@tecsup.edu.pe, fercm04@gmail.com

Recibido: 10-05-24

Revisado: 02-09-24

Aceptado: 13-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Análisis y verificación de los resultados del consumo de combustible en velocidades de baja en vacío de 800 RPM hasta una máxima velocidad de 2000 RPM



Estudio del consumo de combustible y eficiencia del motor CAT C9 a diversos regímenes de r. p. m. mediante el uso de dinamómetro de pruebas

Study of fuel consumption and efficiency of the CAT C9 engine at various RPM regimes through the use of a test dynamometer

RESUMEN

Para garantizar el correcto funcionamiento del motor diésel tras una reparación, es necesario e indispensable someterlo a una prueba dinamométrica en un banco de pruebas, con la finalidad de corroborar que se cumplan la potencia y los parámetros recomendados por el fabricante. Este artículo tiene como objetivo demostrar la importancia del uso de un dinamómetro de pruebas como herramienta de calidad para realizar el estudio del consumo de combustible en un motor diésel Caterpillar modelo C9 cuando está sometido a diferentes regímenes de velocidad angular. El tipo de investigación es aplicada, con un enfoque cuantitativo, y el diseño de la investigación es experimental. Se espera determinar el consumo de combustible real y la variación de la eficiencia del motor diésel durante una prueba dinamométrica. Dichas pruebas nos brindarán datos para gestionar, monitorear y controlar los recursos a emplear durante los procesos de pruebas dinamométricas.

Para poder lograr esto, se ha recolectado información como: consumo de combustible, frecuencias de inyección, tiempo de duración de la inyección de combustible y la corriente promedio del solenoide de la válvula de control IAP. Todos estos parámetros van a ser medidos e interpretados mediante espectros de las señales de accionamiento de los inyectores y del solenoide de la válvula cuando el motor diésel Caterpillar modelo C9 está sometido a diferentes regímenes de velocidad. Se analizaron y verificaron los resultados del consumo de combustible en velocidades bajas, en vacío, de 800 r. p. m. hasta una velocidad máxima de 2000 r. p. m., hallando una relación directamente proporcional con el consumo de combustible. Asimismo, se determinó la relación que presenta el consumo de combustible con las señales de accionamiento de los solenoides de la válvula IAP e inyectores.

Este artículo comprueba la importancia del estudio y análisis del consumo de combustible en relación con el accionamiento mecánico y electrónico del motor diésel modelo C9, mediante el uso de un dinamómetro de pruebas. En conclusión, esta herramienta permite verificar cómo el consumo de combustible guarda relación directa con los diferentes regímenes de velocidad, además de otros parámetros como las temperaturas y presiones del motor.

ABSTRACT

To ensure the proper functioning of the diesel engine after a repair, it is necessary and essential to subject it to a dynamometric test on a test bench, in order to verify that the power and parameters recommended by the manufacturer are met. This article aims to demonstrate the importance of using a test dynamometer as a quality tool to study fuel consumption in a CATERPILLAR C9 diesel engine when subjected to different angular speed regimes. The research type is applied, with a quantitative approach, and the research design is experimental. The goal is to determine the actual fuel consumption and the variation in engine efficiency during a dynamometer test. These tests will provide data to manage, monitor, and control the resources to be used during the dynamometer testing processes.

To achieve this, information has been collected such as fuel consumption, injection frequencies, injection duration, and the average current of the IAP control valve solenoid. All these parameters will be measured and interpreted through spectra of the actuator signals of the injectors and solenoid valve when the CATERPILLAR C9 diesel engine is subjected to different speed regimes. The results of fuel consumption at low idle speeds of 800 RPM to a maximum speed of 2000 RPM were analyzed and verified, finding a directly proportional relationship



Palabras Claves

Eficiencia del motor diésel, productividad, consumo de combustible, Motor Caterpillar C9, potencia, torque, optimización

Key words

Diesel engine efficiency, Productivity, Fuel consumption, Caterpillar C9 engine, Power, Torque, Optimization.

with fuel consumption. Additionally, the relationship between fuel consumption and the actuator signals of the IAP valve solenoids and injectors was determined.

This article confirms the importance of studying and analyzing fuel consumption in relation to the mechanical and electronic actuation of the C9 diesel engine, using a test dynamometer. In conclusion, this tool allows verification of how fuel consumption is directly related to different speed regimes, as well as other parameters such as engine temperatures and pressures.

INTRODUCCIÓN

Cuantificar el consumo de combustible en motores diésel es fundamental para planificar los costos operativos semestrales y anuales en empresas de reparación de motores diésel. Estas programan reparaciones y pruebas en dinamómetros, lo que genera la necesidad de conocer y estandarizar el consumo de combustible del motor a diferentes regímenes de velocidad. Sin embargo, no se dispone de datos técnicos sobre el consumo de combustible al realizar pruebas de rendimiento en el motor Caterpillar modelo C9.

El dinamómetro de prueba Power Test es una herramienta de alta calidad que permite medir parámetros técnicos como la potencia y el torque en motores diésel. Estos datos se comparan con las especificaciones del fabricante. Por esta razón, muchas empresas mineras, marítimas, petroleras y de transporte someten sus motores reparados a pruebas en dinamómetro para garantizar su confiabilidad y disponibilidad. En Perú, empresas como Ferreyros, Cummins, Mur Wy y Detroit cuentan con dinamómetros de prueba, lo que nos convierte en el primer instituto técnico superior en disponer de un dinamómetro de la misma marca, permitiendo así el estudio del consumo de combustible en diversos motores diésel.

En la figura 1, se observan los componentes mecánicos y electrónicos del motor diésel estudiado en esta investigación. El objetivo del proyecto es demostrar que, mediante el uso del dinamómetro de pruebas, se puede calcular y analizar el consumo de combustible del motor diésel Caterpillar modelo C9, así como examinar el comportamiento de los componentes electrónicos del sistema de combustible, incluyendo el tiempo de inyección electrónica y la corriente promedio del solenoide.

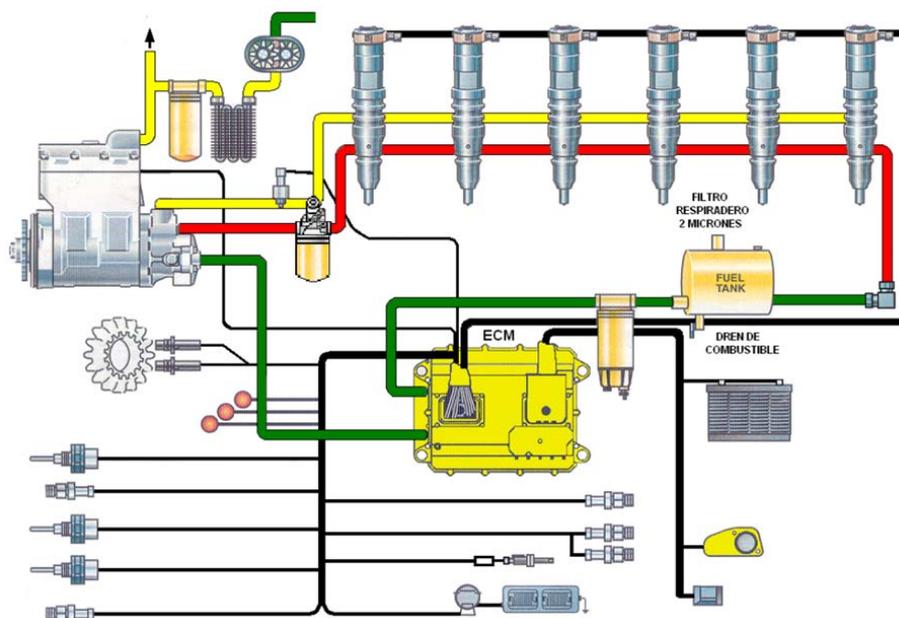


Figura 1. Sistema de combustible tipo HEUI del motor Caterpillar modelo C9

Fuente: [2].

FUNDAMENTOS

Merchán [5] determinó que dicha técnica se basa en las ecuaciones matemáticas que definen la dinámica de un motor de combustión interna. Esta técnica está diseñada para medir el rendimiento a partir de la velocidad angular del motor, acelerándolo sin someterlo a ninguna carga adicional, salvo las pérdidas mecánicas provocadas por la transmisión y la fricción de sus componentes.

Morales y Rivadeneira [7] afirman que este equipo es esencial para realizar pruebas controladas del rendimiento de un motor diésel en condiciones de laboratorio. Además, destacan la

importancia de estudiar el motor en las condiciones atmosféricas de la ciudad de Quito, Ecuador, debido a las elevadas emisiones características de los motores diésel, como el dióxido de azufre, monóxido de carbono y material particulado, entre otros. La solución comienza con el diseño de motores y sistemas de alimentación de combustible, la búsqueda de combustibles ecológicos, el desarrollo de dispositivos de postcombustión y la implementación de tecnologías alternativas en los motores.

Jaya y Mancheno [3] analizan el comportamiento de un motor de encendido por compresión usando mezclas de biodiésel, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica en la generación de potencia en motores diésel. Los resultados de las pruebas se dividen en tres variables: el control de calidad de las mezclas de

biodiésel, las especificaciones de torque, potencia, consumo específico y eficiencia total, y, finalmente, las emisiones de gases de escape.

Llanes, Grefa, Molina y Rocha [4] señalan que los vehículos livianos generan una considerable cantidad de polución en el tránsito local, tanto en horario normal como en horas pico. Por ello, se subraya la importancia de estudiar el consumo de combustible de los vehículos al utilizar el aire acondicionado, a través de un monitoreo electrónico con el software OBD2 ELM327 en la zona de Shushufindi.

Sun *et al.* [8] indican que los costos de combustible están directamente relacionados con el rendimiento del motor de combustión y el indicador clave de la economía de combustible. Este estudio en tractocamiones demuestra la importancia del consumo de combustible en diferentes escenarios, comparando las pruebas entre vehículos de celdas de combustible y tractocamiones con celdas de combustible, ambos bajo una velocidad constante de 40 km/h.

Schmidt, Kimmich, Straky e Isermann (2000) [9] señalan que los sistemas de inyección diésel modernos deben satisfacer diversas demandas. Además de optimizar el tiempo de inyección y la asignación de los tiempos, se presta especial atención al aumento de la presión de inyección para mejorar la combustión y reducir las emisiones de gases de escape. Dado que estos sistemas son cada vez más complejos y los componentes, especialmente los de la parte de alta presión de las bombas de inyección, soportan una gran carga, surge la necesidad de supervisar los componentes delicados.

Macián, Luján, Guardiola y Perles (2006) [6] presentan una lista de los principios seleccionados para detectar irregularidades en el suministro de combustible: velocidad del eje del motor convencional (n), presión de los gases de escape (P), temperatura de los gases de escape (T) y velocidad del eje del turbocompresor (n). Para compararlos, se empleará un enfoque lineal unificado basado en la transformada discreta de Fourier.

Castillo, López, Serrato, Tibaquirá y Castaño (2020) [1] aplican diferentes estrategias de eficiencia aplicados a vehículos de transporte para fijar y estandarizar los procedimientos de medición, regulación y control del consumo de combustible en diferentes vehículos, para garantizar que estos vehículos cumplan con los límites de emisiones a diferentes velocidades específicas del motor.

Es importante destacar que, actualmente, no existe un *paper* que especifique el consumo de combustible de un motor diésel Caterpillar modelo C9 en un dinámometro de prueba a diferentes regímenes de velocidad. Esta investigación contribuirá de manera significativa a la cuantificación del consumo real de combustible del motor diésel y al análisis del comportamiento de diversas variables al someterlo a una prueba dinámométrica.

METODOLOGÍA

En el presente estudio, se ha sometido al motor diésel Caterpillar modelo C9 a diferentes regímenes de velocidad, monitoreando y recopilando información mediante el *software* Electronic Technician de Caterpillar. Los parámetros observados incluyen la velocidad del motor, la presión de activación de inyección, el caudal de combustible y la corriente de activación del inyector. Además, se ha utilizado un osciloscopio para monitorear las frecuencias y tiempos de activación del sistema de inyección.

En la figura 2, se muestran los parámetros de funcionamiento del motor diésel a 800 r. p. m. El *data logger* del *software* Electronic Technician ha verificado que el caudal mínimo de combustible entregado es de 4,5 L/h y el caudal máximo es de 5,25 L/h, lo que da una media de 4,87 L/h. Esta variación entre los valores mínimos y máximos se debe a las fluctuaciones en las r. p. m., que oscilan entre 797 y 805 r. p. m. Finalmente, se evidencia una frecuencia de activación de 1 kHz durante el paso del caudal hacia los inyectoros.

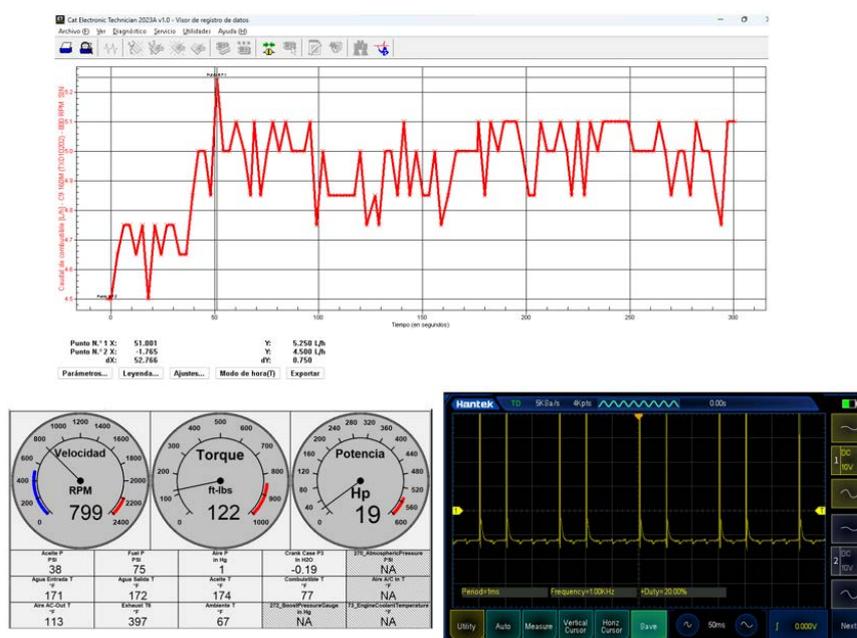


Figura 2. Caudal de combustible vs. frecuencia de activación de inyección a 800 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, se muestran los parámetros de funcionamiento del motor diésel a 2000 r. p. m. El *data logger* del *software* Electronic Technician ha verificado que el caudal mínimo de combustible entregado es de 14,6 L/h y el máximo es de 19 L/h, lo que da una media de 16,8 L/h. Esta variación entre mínimos y máximos

se debe a las fluctuaciones en las r. p. m., que oscilan entre 1993 y 2004 r. p. m. Finalmente, se evidencia una frecuencia de activación de 2,08 kHz durante el paso del caudal de combustible hacia los inyectores.

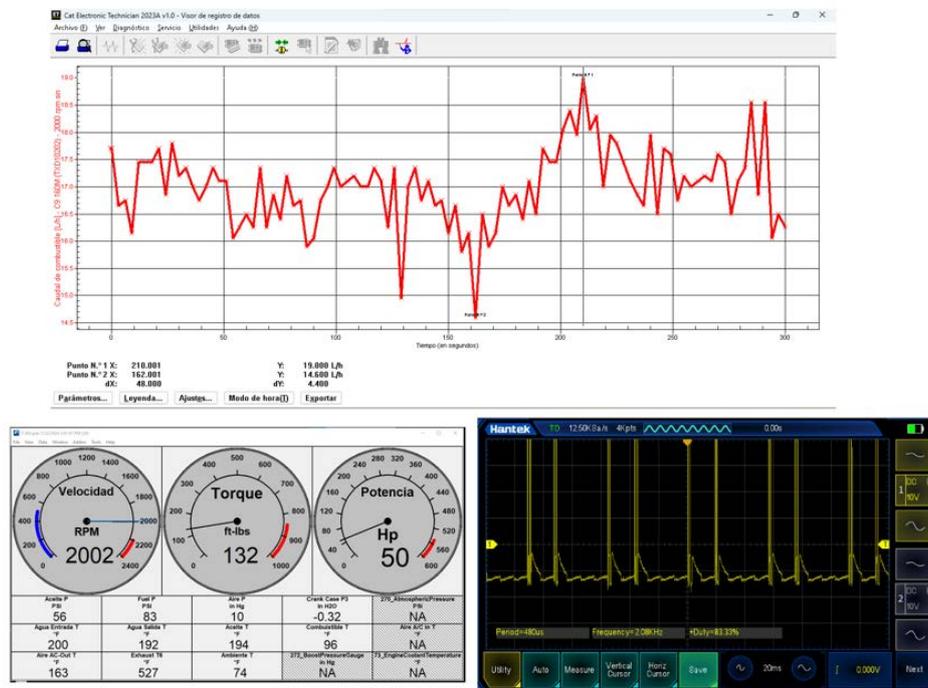


Figura 3. Caudal de combustible vs. frecuencia de activación de inyección a 2000 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla 1 se presenta el desempeño de cada una de las variables mencionadas a distintos regimenes de trabajo, desde 800 r. p. m. hasta un máximo de 2000 r. p. m. En cada

caso, se muestran el caudal de combustible (L/h), la corriente de activación de inyección (%), y la presión de activación del inyector (kPa).

Tabla 1
Desempeño de variables

Velocidad del motor en r. p. m.	Caudal de combustible L/h	Presión activación inyección Kpa	Corriente activación inyector %
800	4,88	15 680,00	40,85
900	6,13	16 043,75	40,03
1000	6,48	17 766,25	41,55
1100	7,95	19 885,00	42,03
1200	9,33	20 248,75	42,63
1300	9,90	20 230,00	42,28
1400	10,83	20 292,50	41,93
1500	11,58	20 291,25	41,58
1600	12,53	20 552,50	41,00
1700	14,08	20 957,50	41,93
1800	15,50	21 401,25	42,05
1900	16,23	19 522,50	41,23
2000	16,80	17 706,25	40,85

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

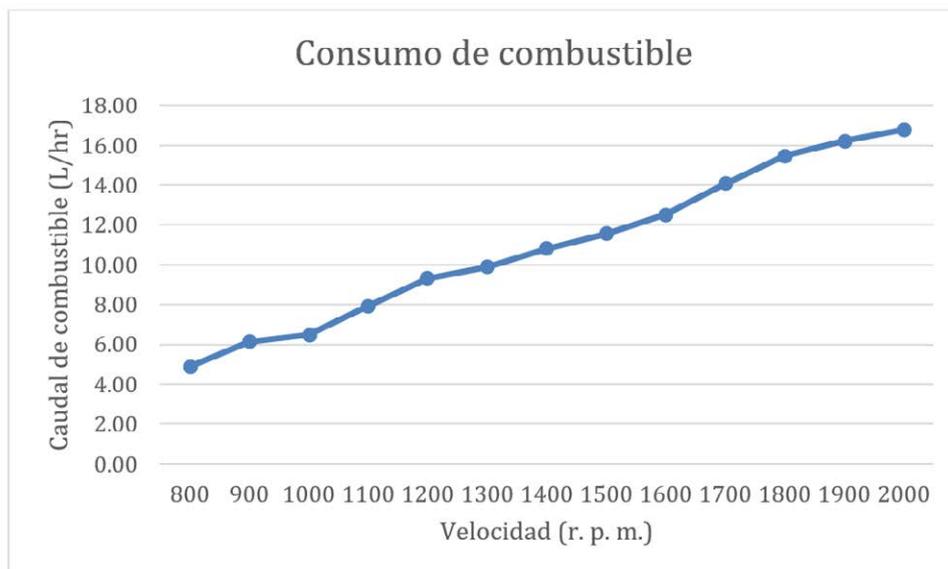


Figura 4. Consumo de combustible vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad – r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (Consumo de combustible - L/h): El consumo de combustible varía entre aproximadamente 4 L/h y 17 L/h.
3. Existe una relación directamente proporcional entre las r. p. m. del motor y el consumo de combustible. A mayores r. p. m., el motor requiere más energía, lo que se refleja en un aumento del consumo de combustible.
4. Respecto a la eficiencia del motor, se observa que la pendiente constante del incremento sugiere un comportamiento predecible y lineal en cuanto al consumo de combustible en relación con las r. p. m. No obstante, el aumento continuo del consumo indica que el motor es menos eficiente a altas r. p. m., ya que el consumo de combustible por unidad de trabajo realizado es mayor.

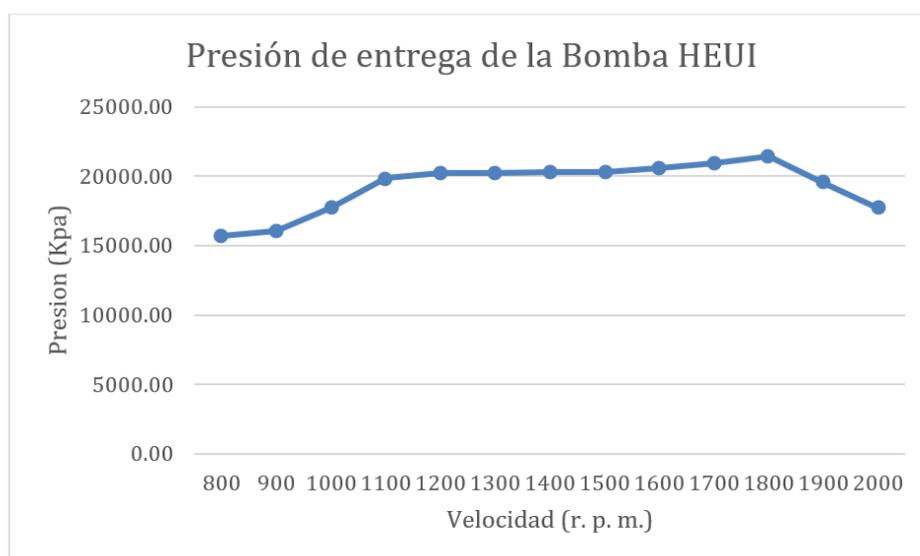


Figura 5. Presión de entrega de bomba HEUI vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad - r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (presión - kPa): La presión de entrega varía entre aproximadamente 15 000 kPa y 22 000 kPa.
3. La presión de entrega de la bomba HEUI aumenta con la velocidad del motor hasta alcanzar una meseta estable en un rango moderado de 1100 a 1600 r. p. m., lo que propone que la bomba está diseñada para mantener una presión constante en ese rango de operación.

4. La estabilización de la presión entre 1100 y 1600 r. p. m. indica que la bomba HEUI optimiza el rendimiento de manera más eficiente dentro de este rango de r. p. m., un factor crucial para mejorar tanto el rendimiento como la economía de combustible del motor.
5. La presión de entrega es esencial para una correcta inyección de combustible. Las variaciones observadas fuera de la meseta, es decir, entre 800 y 1100 r. p. m. y entre 1600 y 2000 r. p. m., podrían afectar la atomización y la combustión del combustible, lo que a su vez influiría en el rendimiento del motor.

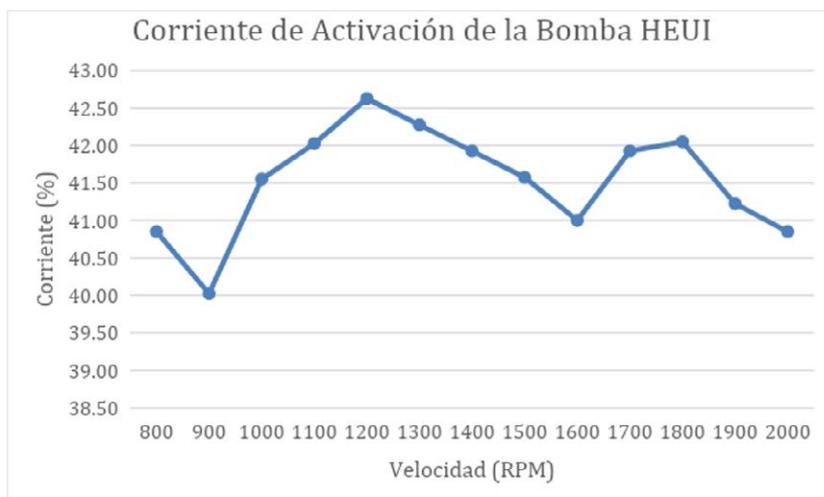


Figura 6. Corriente de activación de la bomba HEUI vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad - r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (corriente - %): La corriente de activación de la bomba HEUI varía entre aproximadamente 39,50 % y 43,00 %.
3. La corriente de activación de la bomba HEUI no es constante y fluctúa según la velocidad del motor, lo que sugiere que la demanda de corriente depende tanto de la carga como del régimen de funcionamiento del motor.
4. Los picos y caídas en la gráfica indican puntos de ajuste

o eficiencia en la operación de la bomba HEUI a diferentes velocidades. La bomba parece estar optimizada para operar de manera más eficiente a ciertos regímenes, como lo indica el pico observado alrededor de las 1200 r. p. m.

5. Las variaciones en la corriente de activación pueden influir en el rendimiento y la eficiencia del motor diésel, ya que la correcta inyección de combustible es un factor clave para su funcionamiento óptimo.

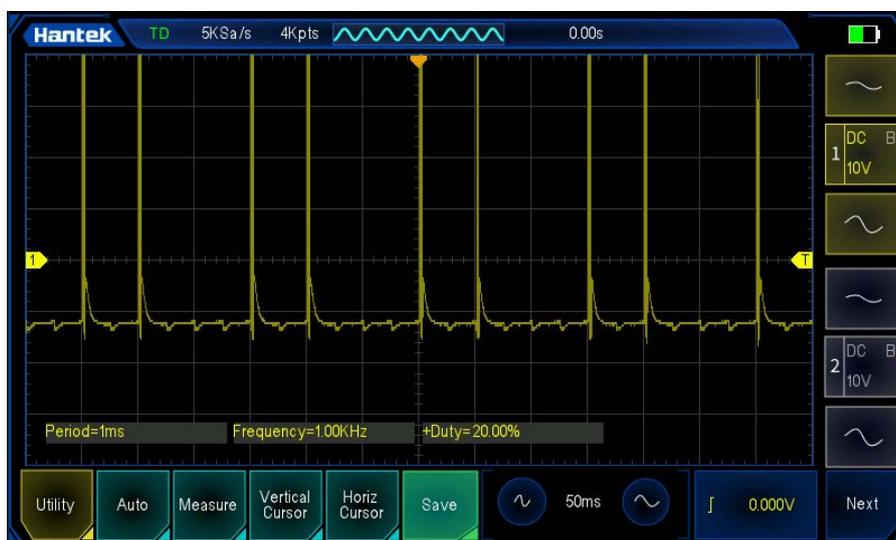


Figura 7. Frecuencia de activación de inyección de combustible a 800 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

La forma de onda mostrada en la figura 7 es una señal periódica con un patrón consistente. Su frecuencia es de 1,00 kHz y su periodo es de 1 ms, lo que concuerda con dicha frecuencia. Estas observaciones indican que la señal medida es una señal

de pulso periódica con una frecuencia relativamente baja y un ciclo de trabajo pequeño, lo que sugiere su potencial utilidad en aplicaciones de procesamiento de señales digitales o modulación por ancho de pulso (PWM).



Figura 8. Frecuencia de activación de inyección de combustible a 2000 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

La señal mostrada en la figura 8 presenta una frecuencia más baja y un ciclo de trabajo menor en comparación con la señal de la figura 7. Estas características pueden ser beneficiosas en diversas aplicaciones de procesamiento de señales y control. Una señal con menor frecuencia y ciclo de trabajo reducido puede ser útil en situaciones donde se necesita una menor tasa de activación o un menor consumo de energía, lo cual es ideal para aplicaciones que priorizan la eficiencia energética.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis del consumo de combustible en distintos regímenes de velocidad del motor diésel Caterpillar modelo C9, se concluyen los siguientes puntos:

- La relación directa entre la velocidad y el consumo de combustible reveló que el consumo del motor diésel está estrechamente vinculado a los regímenes de velocidad. Se observó un incremento en el consumo a medida que aumentaban las r. p. m., lo que es consistente con el funcionamiento de los motores de combustión interna, donde mayores velocidades exigen más energía y, por tanto, mayor consumo de combustible.
- En diversas pruebas, el caudal de combustible varió según la velocidad, fluctuando en función de las r. p. m. Por ejemplo, a 800 r. p. m., el caudal osciló entre 4,7 y 5,3 litros/hora, mientras que, a 1000 r. p. m., la variación fue de 6,3 a 6,7 litros/hora. Estas fluctuaciones reflejan la adaptación del sistema de inyección a las demandas operativas del motor.
- En cuanto al accionamiento de los solenoides, se encontró una relación significativa entre el consumo de combustible y las señales de activación de los solenoides de la válvula IAP

y los inyectores. Este hallazgo subraya la importancia de la calibración y el control electrónico para optimizar el consumo de combustible.

- La corriente de activación de la bomba HEUI varía según la velocidad del motor, mostrando picos y caídas que indican puntos de eficiencia o ajustes en la bomba para diferentes velocidades. Estas variaciones pueden influir en el rendimiento y la eficiencia del motor.
- La frecuencia de activación de la inyección de combustible es de 1 kHz a 800 r. p. m. y de 2,08 kHz a 2000 r. p. m. Estas señales periódicas y sus características sugieren que la inyección está optimizada para distintos regímenes de velocidad, contribuyendo al rendimiento y eficiencia del motor.

REFERENCIAS

- [1] Castillo Herrera, J., López Restrepo, J., Serrato Tobón, D., Tibaquirá Giraldo, J. & Castaño Pérez, S. (2020). Desarrollo de una metodología de medición de consumo de combustible para vehículos livianos en Colombia, basada en principios de metrología/Development of a fuel consumption measurement methodology for light duty vehicles in Colombia, based on metrology principles. *Dyna*, 87(212), 47-56. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78899>
- [2] Caterpillar. (2008). *Manual del motor ACERT C9*.
- [3] Jaya, E. & Mancheno, P. (2009). *Determinación de las características de funcionamiento y rendimiento de un motor encendido por compresión al utilizar mezclas de biodiésel* [Tesis de pregrado, Universidad Superior

Politécnica de Chimborazo]. Universidad Superior Politécnica de Chimborazo.

- [4] Llanes, E., Shiguango, S., Molina, J. & Rocha, J. (2024). Incidence of automotive air conditioning on the index of fuel consumption in spark ignition vehicle on a route in the Ecuadorian Amazon. [Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la Amazonía Ecuatoriana]. *Ingenius*, (31), 115-126. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.10>
- [5] Merchan, C. (2004). *Determinación de la potencia y el torque en motores de combustión interna mediante la aceleración libre* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Universidad Industrial de Santander.
- [6] Macián V., Lujan J., Guardiola C. & Perles A. (2006). A comparison of different methods for fuel delivery unevenness detection in Diesel engines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8), 2219–2231. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.001>
- [7] Morales, D. & Ribadeneira, A. (2007). *Dimensionamiento de un banco para pruebas de motores a diésel* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Escuela Politécnica Nacional.
- [8] Sun, T. *et al.* (2021). Experimental study on fuel economy of fuel cell truck under different driving cycle. In *2021 4th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE)* (pp. 38-43). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACEEE51855.2021.9575149>
- [9] Schmidt, M., Kimmich, F., Straky, H., & Isermann, R. (2000). Combustion supervision by evaluating the crankshaft speed and acceleration. *SAE Technical Paper*, 2000-01-0558. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0558>

Antes de unirse a Tecsup, trabajó como técnico de maquinaria pesada con las marcas Doosan, Jhon Deere, Caterpillar y Case, para luego estar en el área de planeamiento y, por último, supervisor de equipo de flota pesada.

@ creategui@tecsup.edu.pe

Brayan Oswaldo Garrido Rios

Docente del Departamento de Mecánica. Bachiller en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad Privada del Norte, técnico en Electricidad Industrial de la escuela de Senati, diplomado en gestión del mantenimiento basado en la confiabilidad. Cuenta con más de 5 años de experiencia laboral en la industria, en el área de proyectos, automatización, programación con variadores y PLC y mantenimiento de equipos médicos. Actualmente, se desempeña como docente de la carrera de mecánica en Tecsup Centro.

@ bgarrido@tecsup.edu.pe

José Ernesto Alvarado Alvarrán

Magíster en Gerencia del Mantenimiento, ingeniero industrial y técnico en Mecánica Automotriz. Docente del Departamento de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada en Tecsup. Actualmente, desempeña labores en la línea de la gestión del mantenimiento, tren de fuerza, motores diésel, evaluación y reusabilidad de componentes del motor, diagnóstico y prueba dinámométrica.

Antes de unirse a Tecsup, trabajó como especialista mentor en Motores Caterpillar en el dealer de Caterpillar la empresa Ferreyros S. A. para luego desarrollar la posición de jefe de Mantenimiento en la empresa Sermec SAC, dedicada al sector de la pesca y energía.

@ jalvaradoa@tecsup.edu.pe

Recibido: 23-02-24
 Revisado: 10-09-24
 Aceptado: 24-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

ACERCA DEL AUTOR

Christopher Jesus Reategui Olivares

Técnico de Mantenimiento de Maquinaria Pesada y bachiller en Ingeniería Industrial. Docente del departamento de Mecánica y Aviación, actualmente está encargado de la línea de motores donde se desempeña en las áreas de mantenimiento de motores diésel, diagnóstico de motores diésel, pruebas en dinamómetro de motores diésel y tren de fuerza del equipo pesado.



CURSOS Y PROGRAMAS DE EXTENSIÓN

NUESTROS DEPARTAMENTOS
SON LA CLAVE
PARA ALCANZAR
TU POTENCIAL



**¡Conviértete en un profesional
altamente calificado!**

984 879 904

www.tecsup.edu.pe

Evaluación de la viabilidad para producir ácido cítrico mediante la fermentación de *Aspergillus niger* salvaje en una solución azucarada



Biología aplicada en la obtención de ácido cítrico por fermentación de azúcar por parte del moho del género *Aspergillus* de fuente ambiental

Biotechnology Applied to the Production of Citric Acid Through Sugar Fermentation by Aspergillus Mold from an Environmental Source

RESUMEN

El ácido cítrico es una de las materias primas de gran utilidad en la industria de alimentos y en otras industrias que requieran un ácido orgánico. Este compuesto se obtiene en cantidades industriales por medio de fermentación de hidratos de carbono como melazas y otros productos ricos en hidratos de carbono. El presente trabajo tiene la finalidad de obtención de ácido cítrico por medio de fermentación por medio de mohos del género *Aspergillus* aislada de un medio de cultivo de control ambiental.

Luego del aislamiento e identificación del moho del género *Aspergillus* por microscopía óptica, fue inoculado en una solución azucarada que incluye sales de fosfato. Luego de dos meses se esterilizó y filtró el cultivo, se realizaron pruebas de acidez y se separó el ácido carboxílico por métodos clásicos de precipitación y se caracterizó el producto por pruebas orgánicas clásicas, espectroscopia infrarroja y microscopía óptica teniendo un rendimiento de 15%. Este trabajo es el primer trabajo en Tecsup.

Este artículo comprueba la importancia del estudio y análisis del consumo de combustible en relación con el accionamiento mecánico y electrónico del motor diésel modelo C9, mediante el uso de un dinamómetro de pruebas. En conclusión, esta herramienta permite verificar cómo el consumo de combustible guarda relación directa con los diferentes regímenes de velocidad, además de otros parámetros como las temperaturas y presiones del motor.

ABSTRACT

Citric acid is a highly useful raw material in the food industry and other industries requiring an organic acid. This compound is produced on an industrial scale through the fermentation of carbohydrates such as molasses and other carbohydrate-rich products. The present study aims to obtain citric acid through fermentation using Aspergillus molds isolated from an environmental control culture medium.

After isolating and identifying the Aspergillus mold via optical microscopy, it was inoculated into a sugar solution containing phosphate salts. After two months, the culture was sterilized and filtered, acidity tests were performed, and the carboxylic acid was separated using classical precipitation methods. The product was then characterized using classical organic tests, infrared spectroscopy, and optical microscopy, achieving a 15% yield. This study represents the first work of its kind conducted at Tecsup.



Palabras Claves

Melazas, mohos, ácido cítrico, biotecnología.

Key words

Molasses, molds, citric acid, biotechnology.

INTRODUCCIÓN

El ácido cítrico es un aditivo muy usado en las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética por sus propiedades conservantes y antioxidantes. La demanda global de este compuesto crece constantemente, generando interés en métodos de producción más eficientes y sostenibles. Tradicionalmente, se ha producido mediante procesos químicos de alto costo y considerable impacto ambiental, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas biotecnológicas para su fabricación.

Carl Scheele fue un químico farmacéutico sueco que a finales del siglo XVIII, descubrió no solo ácido cítrico sino también otros ácidos orgánicos de frutas y bayas, desarrollando técnicas de aislamiento y purificación. (Sverberg G, 2012).

Scheele desarrollo una técnica que le permitió aislar del jugo de limón en 1784 cristales de ácido cítrico. (Di Lorenzo ,2022).

La obtención de ácido cítrico a nivel industrial se inició extrayéndolo del jugo de limón, Esto evidentemente elevaba el precio del ácido cítrico.

En el siglo XIX el botánico alemán Wermer en 1893 encontró la factibilidad de obtener ácido cítrico a través de la fermentación del azúcar que contenían sales inorgánicas. (Lende et al 2021).

En 1917 James Currie y Charles Thom descubrieron que el *Aspergillus niger* fermentaba azúcar produciendo ácido cítrico. A partir de 1923, los laboratorios Pfizer patentó el proceso de fermentación Currie-Thom (Ksiasek, 2024)

Según (Martin E., 1953) comenta que en Hawaii se obtenía ácido cítrico a partir de restos de piña.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad de producir ácido cítrico mediante la fermentación de *Aspergillus niger* salvaje en una solución azucarada. Específicamente, se busca lo siguiente:

- Identificar las condiciones óptimas de fermentación, incluyendo temperatura y pH.
- Caracterizar el ácido cítrico mediante espectroscopia infrarroja.

FUNDAMENTOS

Los hongos constituyen un grupo diverso de organismos mohos, zetas y levaduras, Se estimó para el 2014, alrededor de 100000 especies de hongos. Los hongos se clasificaron como talofitas en el antiguo sistema de clasificación de Van Tieghem para los vegetales (Vidal, 1938) como organismos vegetales que no realizaban fotosíntesis. La mayoría son microscópicos y terrestres. Parasitan plantas y provocan enfermedades en animales y en humanos (Madigan et al , 2015), invaden alimentos generando descomposición de ellos. Sin embargo, se les emplea en procesos fermentativos industriales muy importantes como en la fabricación del vino, la cerveza, fabricación de salsa de soya, obtención de aminoácidos como el glutamato monosódico empleado como un saborizante, entre otros. Los mohos son quimiorganotrofos es decir por medio de enzimas digieren compuestos complejos

como polisacáridos, son en su mayoría aerobios es decir necesitan presencia de oxígeno. Los hongos en general son pluricelulares y forman verdaderos entramados filamentosos llamados hifas. Las hifas visibles se denomina micelio este presenta ramas aéreas que se les llama conidios que son esporas que realizan la función de reproducción.

Dentro de los mohos la especie *Aspergillus niger* es un moho que contamina alimentos. Crece generando unas masas aterciopeladas oscuras. Estos mohos se emplean en la producción de ácido cítrico.

El *Aspergillus niger* se ha utilizado tradicionalmente en cepas específicas debido a su robusta capacidad para metabolizar sustratos como soluciones azucaradas y convertirlos en ácido cítrico (Martin E, 1953). El ácido cítrico según la nomenclatura IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry (ácido 2-hidroxiopropano -1, 2,3 tricarboxílico) es un ácido alfa hidroxipolicarboxílico que se encuentra en frutas cítricas como el limón, naranja pero también en otras frutas.

Monrroy et al reportaron obtener ácido cítrico por fermentaciones residuos y cascaras de *Musa paradisiaca* (plátano) como una alternativa sostenible de procesamiento de residuos vegetales.

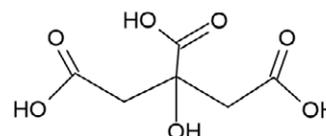


Figura 1. Estructura química del ácido cítrico

Fuente: Elaboración propia

El ácido cítrico que se obtiene hoy en día por fermentación de azúcares como la glucosa .Desde 1930 se iniciaron estudios sobre su biosíntesis en el moho de *Aspergillus*, se sabe que el proceso es a nivel mitocondrial del moho. La fermentación se efectúa la vía de la glucólisis y la vía de las pentosas a nivel mitocondrial donde está presente la enzima citrato sintasa la que cataliza la síntesis de ácido cítrico. Estudios previos destacan la importancia de controlar condiciones de fermentación como pH, temperatura y concentración de nutrientes entre los que destacan algunos cationes como ion Cu^{2+} , Fe^{3+} ; Zn^{2+} ; para maximizar el rendimiento y la pureza del producto final. Además, la genética y capacidad de adaptación de las cepas de *Aspergillus niger* han sido áreas clave de investigación para mejorar la eficiencia y estabilidad de la producción industrial del ácido cítrico.

Este estudio se centra en la fermentación de una solución azucarada mediante *Aspergillus niger* salvaje para obtener ácido cítrico. La investigación parte de la premisa de que las cepas salvajes pueden presentar variabilidad genética, lo que podría mejorar la producción de ácido cítrico en comparación con cepas comerciales. No obstante, se reconocen ciertas limitaciones, como la necesidad de optimizar las condiciones de fermentación para maximizar el rendimiento y mantener la calidad del producto. También es fundamental caracterizar las cepas salvajes y evaluar su estabilidad y capacidad de producción a largo plazo, aspectos críticos que este estudio abordará.

METODOLOGÍA

Se aisló de un medio de cultivo una parte de la colonia de moho para su caracterización. Empleamos la metodología (Frazier, 1992) para el reconocimiento del moho basado en la forma de hifa, color de hifas y del micelio y en la cabeza esporal empleando como instrumento un microscopio óptico.

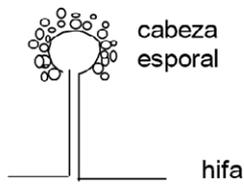


Figura 2. Esquema de un moho de *Aspergillus* partes para su identificación

Fuente: Elaboración propia

Este estudio se realizó con el objetivo de obtener ácido cítrico mediante la fermentación con *Aspergillus niger*. Para ello, se siguieron los siguientes pasos:

1. PREPARACIÓN DE MEDIOS Y SEMBRADO DE PLACAS

Se prepararon placas de cultivo con agar Saboureaud como agente gelificante. Luego, *Aspergillus niger* fue inoculado del ambiente en estas placas y se incubó en condiciones controladas para asegurar un crecimiento óptimo, obteniendo así una cepa salvaje de *Aspergillus*.

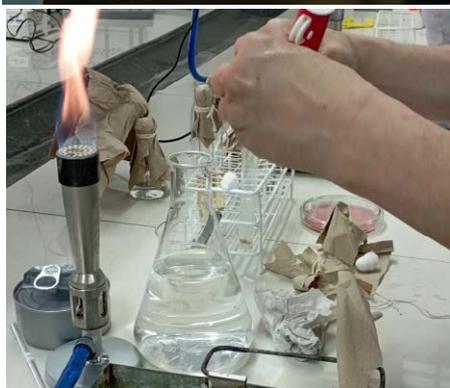
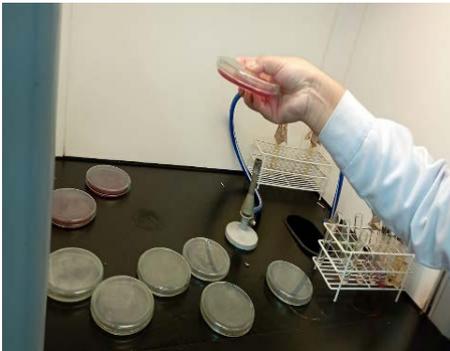


Figura 3. Preparación del agar y vaciado de placas

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4. Sembrado de placas del ambiente

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. *Aspergillus* cepa salvaje en la placa

Fuente: Elaboración propia.



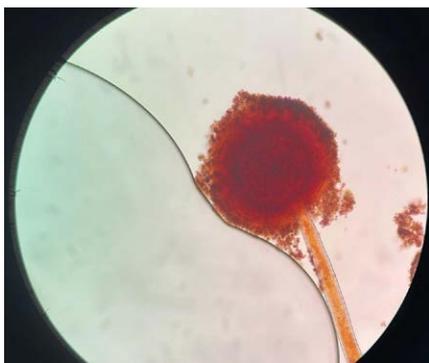


Figura 6. Moho del género *Aspergillus* en el microscopio óptico 400x tinción con solución de Lugol

Fuente: Elaboración propia.

Nota. se observó las hifas y los conidióforos característicos del *Aspergillus niger*.

2. ELABORACIÓN DEL LICOR MEZCLA

Tras 15 días, al obtener colonias adecuadas de *Aspergillus niger*, se procedió a preparar el licor mezcla, utilizando azúcar como principal fuente de carbono.

Este licor mezcla contenía los siguientes componentes:

Tabla 1
Composición del licor madre

Composición	g/L
Sacarosa	140
Nitrato de amonio	2,23
Ortofosfato dipotásico	1
Sulfato de magnesio	0,23
Compuesto de Cu y Fe	

Fuente: Elaboración propia.

Nota. Las concentraciones de estos componentes se ajustaron para maximizar la producción de ácido cítrico.

3. FERMENTACIÓN

El licor mezcla se sometió a fermentación durante dos meses, asegurando la esterilidad del medio se dio permitió el ingreso de aire la para la producción de ácido cítrico por *Aspergillus niger*.



Figura 7. Licor mezcla inoculado con el hongo

Fuente: Elaboración propia.

Nota. Se monitorean cada cuatro días el pH y la temperatura.

4. OBTENCIÓN DEL ÁCIDO CÍTRICO

Al finalizar de la fermentación, el licor mezcla fue llevado a autoclave para ser esterilizado para la extracción del ácido cítrico de *Aspergillus niger*.



Figura 8. Muestra llevada a la autoclave

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, para precipitar el ácido cítrico, se saturó la solución en ebullición con carbonato de calcio en polvo fino, agitando continuamente y dejando reposar la mezcla varias horas para formar citrato de calcio. Luego, se filtró y se lavó el citrato de calcio repetidamente con agua destilada. Posteriormente, el citrato de calcio se disolvió en ácido sulfúrico 5 M, generando sulfato de calcio insoluble y ácido cítrico en solución. Tras filtrar el sulfato de calcio, la solución de ácido cítrico se enfrió para favorecer la cristalización, y finalmente se obtuvo cristales de ácido cítrico.



Figura 9. Cristales de ácido cítrico formados

Fuente: Elaboración propia.

Nota. La solución se enfrió en una refrigeradora a 5 grados por 12 horas.

RESULTADOS

Se realizó un proceso de fermentación para obtener ácido cítrico, durante el cual la temperatura promedio fue de 19,6 °C.

Asimismo, en todos los experimentos se observó una reducción gradual del pH (Fig. 10), lo que indicó la producción del ácido en base al tiempo en días.

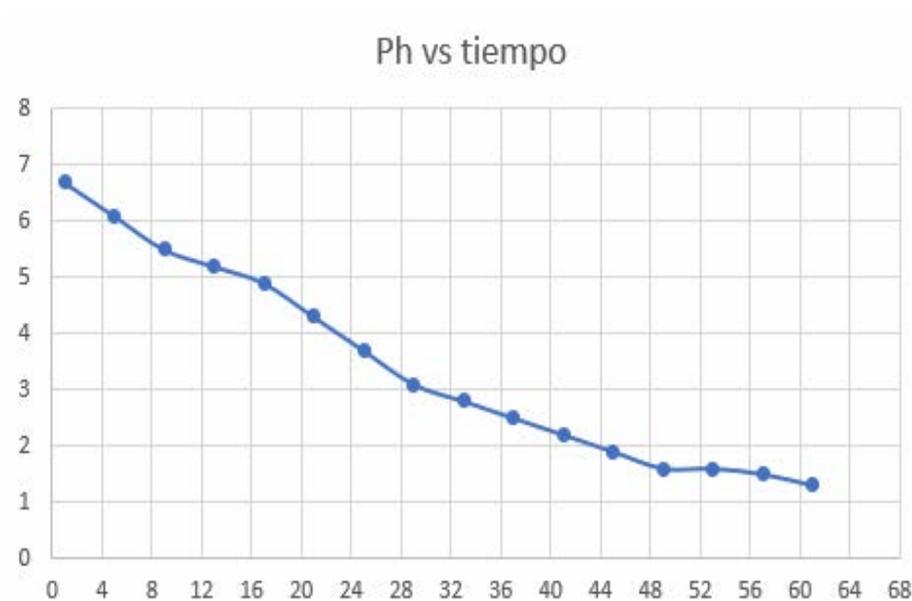


Figura 10. Gráfica de pH vs. Tiempo en días

Fuente: Elaboración propia.

CARACTERIZACIÓN EL ÁCIDO CÍTRICO

Para caracterizar el ácido cítrico obtenido, se utilizó espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con un espectrofotómetro Shimadzu. Los resultados de FTIR

mostraron picos característicos que confirmaron la presencia de ácido cítrico.

A continuación, se describe los picos relevantes observados en el espectro FTIR:

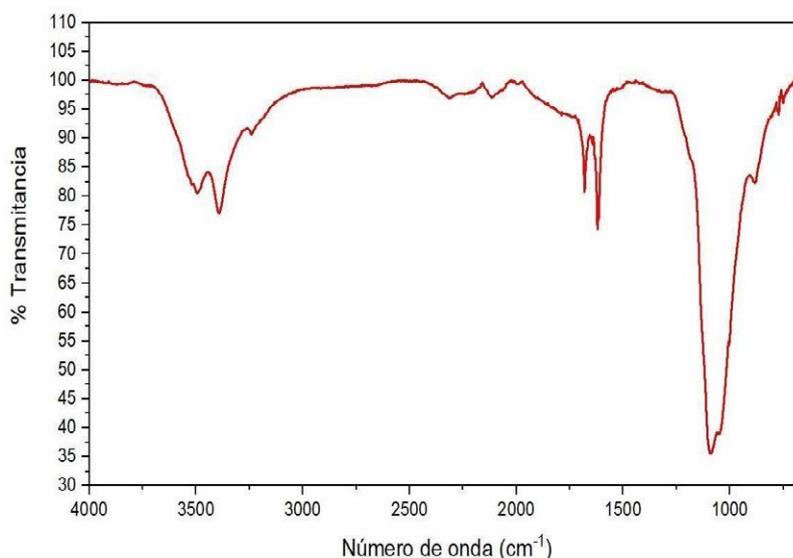


Figura 11. Espectro del ácido cítrico

Fuente: Elaboración propia.

Nota: 3500-3200 cm⁻¹: Banda ancha que representa la vibración de los grupos O-H. 1750-1700 cm⁻¹: Pico agudo que representa la vibración del grupo C=O. 1300-1000 cm⁻¹: Varios picos que representan las vibraciones de los grupos C-O

HALLAZGOS RELEVANTES

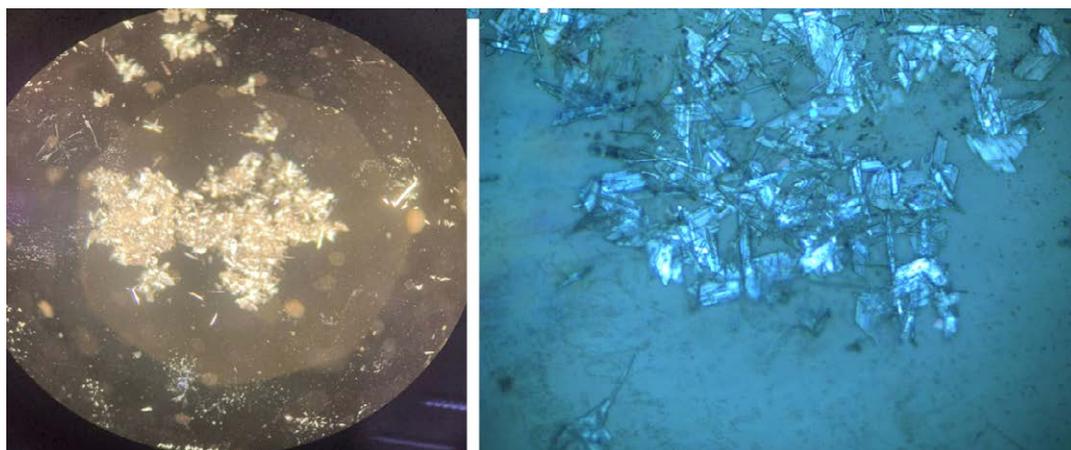


Figura 12. Ácido cítrico bajo un microscopio polarizado

Fuente: Elaboración propia.

Nota. El ácido cítrico exhibe polimorfismo, presentándose en formas anhidra y monohidratada, cada una con propiedades físicas y químicas distintas que afectan su solubilidad, estabilidad y reactividad. Este fenómeno permite que el ácido cítrico se adapte a diversas condiciones, con posibles transiciones entre formas polimórficas en respuesta a cambios de temperatura y humedad.

CONCLUSIONES

- La fermentación del moho *Aspergillus* en una solución azucarada es viable para producir ácido cítrico, ofreciendo una alternativa biotecnológica a los métodos químicos tradicionales.
- La caracterización del ácido cítrico mediante espectroscopia infrarroja confirmó su estructura molecular y pureza, validando la viabilidad del método de producción biotecnológico empleado.

ANEXOS

Máquinas empleadas

- Microscopio Olympus CX31
- Microscopio Leica DM750P
- Autoclave
- Campana extractora
- Cámara de bioseguridad
- Incubadora thermo scientific
- Horno de secado
- FTIR Shimadzu Prestige

REFERENCIAS

- [1] Svedberg G. Royal Swedish Academy of Engineering science <https://www.iva.se/contentassets/e8436f25872e4bca8be92207871a0456/ivas-minneskrift-2012-scheele.pdf>
- [2] Vidal Jorge Curso de Botánica 28a edición editorial Bruño Lima
- [3] Di Lorenzo R., Serra I., Porro D., Branduardi P. Review State of the Art on Microbial production of Industrially relevant Organic Acids Catalyst 2022, 2 ,pp3 <https://www.mdpi.com/2073-4344/12/2/234>
- [4] Lende S., Karemore H., Umekar M. Review of production of citric acid by fermentation of technology GSC Biological and Pharmaceutical Sciences https://www.researchgate.net/publication/357431891_Review_on_production_of_citric_acid_by_fermentation_technology/fulltext/62c5e8db2bdd98698ad8c2b3/Review-on-production-of-citric-acid-by-fermentation-technology.pdf?origin=publication_detail&p=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYVWQILCJwcmV2aW91c1BhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbiJ9fQ&__cf_chl__tk=u5lcg8GhGA4oo85r4QJ9jXBQ3EgXq1ZaryYU-Qd46U8E-1732142686-1.0.1.1-NdaqFe9kxECgMuy-MO1sYaRfq3f24n7wpMJWpmXqBX6A
- [5] Martin, E. (1953). *Farmacía práctica de Remington* (10.^a ed.). UTEHA. Pag 610 Mexico
- [6] Ksiasek Ewelina review citric acid: properties, microbiological productions and application in industries *Molecules* 2024 ,29,22. <https://doi.org/10.3390/molecules29010022> <https://www.mdpi.com/journal/molecules> <https://www.mdpi.com/1420-3049/29/1/22>
- [7] Frazier W.C. Westhoff D.C. *Microbiología de los alimentos* cuarta edición española 1993 Editorial Acribia España pag 30
- [8] Madigan M, Martinko J Bender K, Buckley D , Stahl D Brock *Biología de los microorganismos* 2015 Pearson educación.S.A. España pag 596- 604
- [9] Monroy, M., Rueda, L., Aparicio, A., & Garcia, J. (2019). Fermentation of *Musa paradisiaca* Peels to Produce Citric Acid. *Hindawi Journal of Chemistry*, Article ID 835671.

Recuperado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2019/8356712>

- [10] Pau Loke Show, P. et al. (2015). Overview of citric acid production from *Aspergillus niger*. *Frontiers in Life Science*, 8(3), 271-283. <https://doi.org/10.1080/21553769.2015.1033653>.

ACERCA DE LOS AUTORES

Laurence R. Salmon Barrantes

Químico farmacéutico egresado de la maestría de química por la pontificia Universidad Católica del Perú PUCP, ha trabajado en la industria en productos farmacéuticos y cosméticos, asesor en INDECOPI, y amplia experiencia docente. Desde 2013 docente de tiempo completo en Tecsup en la carrera de procesos químicos y metalúrgicos.

 lsalmon@tecsup.edu.pe

Frank Yamir Paredes Vásquez

Estudiante de la carrera profesional de procesos químicos y metalúrgicos en TECSUP Lima

 frank.paredes@tecsup.edu.pe

Luz Milagros Daza Concha

Estudiante de la carrera profesional de procesos químicos y metalúrgicos en TECSUP Lima

 luz.daza@tecsup.edu.pe

Recibido: 23-02-24

Revisado: 10-09-24

Aceptado: 24-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Control de la calidad del agua
**como eje fundamental
para el desarrollo de un
análisis químico.**



Evaluación de la calidad de agua generada por un equipo purificador para uso en laboratorios de análisis químico

Evaluation of the Water Quality Produced by a Purification System for Use in Chemical Analysis Laboratories

RESUMEN

El presente trabajo de investigación aplicada y descriptiva tiene como objetivo principal evaluar la Calidad del agua purificada para uso de laboratorio de análisis químicos. Es una propuesta muy útil y sencilla que fue aplicada a un sistema de purificación de agua para los laboratorios de un instituto de educación superior en el Perú.

La presente investigación consistió en las siguientes etapas:

- Reconocimiento del proceso de purificación del agua mediante los equipos de ósmosis inversa y agua ultra pura.
- Caracterización del agua de alimentación (agua de poza), agua osmotizada y agua ultra pura. Se aplica un plan de muestreo y los parámetros fisicoquímicos a determinar.
- El análisis de resultados señala que el agua obtenida por el equipo de purificación no se encuentra en los niveles deseados según recomendaciones de las normas ISO 3696 y ASTM D1193. El agua osmotizada no encaja en ninguna categoría y el agua ultrapura realmente es del tipo 3 (III).

Finalmente, se concluye que la calidad de agua obtenida de ambos equipos no son las esperadas, esto significa que hay necesidad de un mantenimiento de los equipos de purificación por parte del proveedor.

ABSTRACT

This applied and descriptive research aims to evaluate the quality of purified water for use in chemical analysis laboratories. It is a very useful and simple proposal that was applied to a water purification system for the laboratories of a higher education institution in Peru. This research consisted of the following stages:

- *Recognition of the water purification process through reverse osmosis equipment and ultrapure water.*
- *Characterization of the feed water (pond water), osmotized water, and ultrapure water. A sampling plan was applied, and the physicochemical parameters to be determined were established.*
- *The analysis of the results indicates that the water obtained from the purification system does not meet the desired levels according to the recommendations of ISO 3696 and ASTM D1193 standards. The reverse osmosis water does not fit into any category, and the ultrapure water is actually type 3 (III).*

Finally, it is concluded that the water quality obtained from both systems does not meet expectations, indicating the need for maintenance of the purification equipment by the supplier.



Palabras Claves

Agua purificada, ósmosis inversa, intercambio iónico, Normas ISO y ASTM.

Key words

Purified water, reverse osmosis, ion exchange, ISO and ASTM standards.

INTRODUCCIÓN

El uso del agua como solvente universal en los laboratorios de análisis químicos implica un mayor cuidado en cuanto a sus características fisicoquímicas, de manera que no afecte el resultado analítico de un ensayo. Es claro que el grado de pureza del agua en un laboratorio va a depender del uso que se le dé, es decir, según la técnica analítica aplicada. Un buen control de la calidad del agua puede ser fundamental en el desarrollo de un análisis químico.

El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del agua purificada que se usa en los laboratorios de un instituto de educación superior. Es importante resaltar que esta investigación puede servir como referencia para su aplicación en otras instituciones.

Los parámetros a determinar estarán establecidos en función de normas internacionales, como la ISO 3696:1987 y ASTM D1193:2018, además de las recomendaciones del manual de los equipos de purificación de agua.

La ventaja de contar con los materiales, reactivos químicos, equipos instrumentales y ambientes adecuados permite realizar los ensayos de dureza, conductividad, etc., y disponer del recurso humano necesario para cumplir con los objetivos trazados.

Finalmente, se analizarán los resultados obtenidos para evaluar la calidad del agua que proporciona nuestro sistema de purificación y tomar acciones correctivas de ser necesario.

FUNDAMENTOS

Los parámetros de calidad del agua, como la dureza total, dureza cálcica, conductividad, entre otros, están definidos por diferentes

Tabla 1
Especificaciones según la norma ASTM D1193:2018

Parámetros Fisicoquímicos	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Conductividad eléctrica (máximo 25° C $\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,056	1,0	0,25	5,0
Resistividad (mínima a 25° C $\text{M } \Omega\text{-cm}$)	18	1,0	4,0	0,2
pH a 25° C	-	-	-	5,0 a 8,0
Carbono Orgánico Total (COT) máximo mg/L	50	50	200	-
Sodio (máximo $\mu\text{g}/\text{L}$)	1	5	10	50
Cloruros (máximo mg/L)	1	5	10	50
Silice Total (máximo $\mu\text{g}/\text{L}$)	3	3	500	-

Fuente: [1].

CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE AGUA SEGÚN NC-ISO 3696: 2004

Agua de grado 1

Está libre de contaminantes como iones disueltos, coloides y materia orgánica. Es un agua de alta pureza, adecuada para los análisis más exigentes, como la cromatografía líquida HPLC.

normas de organismos prestigiosos, que proporcionan a los usuarios las características mediante criterios cuantitativos. Es importante hacer un resumen de las clasificaciones más relevantes sobre la calidad del agua en laboratorios de análisis químico.

CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE AGUA SEGÚN ASTM 1193: 2018

Agua del tipo I

Es el agua de más alta calidad, requerida para análisis de máxima exactitud y precisión, generalmente en técnicas instrumentales como absorción atómica, ICP, cromatografía, biología molecular, cultivos celulares y secuenciación de ADN. Esta agua contiene un nivel mínimo de iones.

Agua del tipo II

Esta agua puede usarse para pruebas analíticas, como las de tipo clásico, así como en análisis hematológicos, serológicos y microbiológicos. La ASTM recomienda que esta agua se prepare mediante destilación [2].

Agua del tipo III

Se recomienda su uso para pruebas generales de laboratorio de tipo cualitativo, uroanálisis, y procedimientos histológicos y parasitológicos. También puede utilizarse para el enjuague previo de material de vidrio.

Agua del tipo IV

Aquí se alcanza una conductividad máxima de $5,0 \mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que su uso está recomendado para la preparación de ciertas soluciones y el lavado previo de material de vidrio.

Agua de grado 2

Contiene muy pocos contaminantes orgánicos e inorgánicos. Puede usarse en análisis instrumentales, como la espectrometría de absorción atómica [4].

Agua de grado 3

Recomendada para diversos análisis químicos en vía húmeda que no requieren una cuantificación estricta, así como para la preparación de reactivos.

Tabla 2
Especificaciones según ISO 3696: 1987 y la NC-ISO 3696:2004

Parámetros	Grado 1	Grado 2	Grado 3
Conductividad eléctrica (máximo a 25 °C $\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,1	1	5
Resistividad ($\text{M } \Omega\text{-cm}$)	10	1	0,2
Absorbancia (UA a 254 nm)	0,001	0,01	-
Sílice total (máximo en mg/L)	0,01	0,02	1
pH	-	-	5,0 a 7,5

Fuente: [3].

TIPOS DE AGUA SEGÚN LAS TÉCNICAS DE PURIFICACIÓN

Agua destilada

Este es el método más antiguo, que consiste en calentar el agua hasta su punto de ebullición y condensar los vapores para obtener agua destilada. Se eliminan las sales, los sólidos en suspensión, la materia orgánica y los microorganismos [7].

Agua osmotizada

Se obtiene mediante la técnica de filtración por ósmosis inversa, que consiste en aplicar presión al agua para empujarla a través de una membrana semipermeable, filtrándola. La membrana permite el paso de moléculas de agua pura, reteniendo así las impurezas [5].

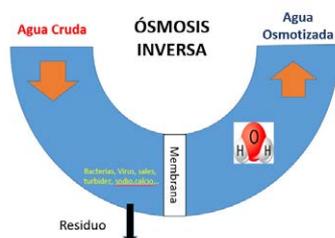


Figura 1. Proceso de ósmosis inversa

Fuente: Elaboración propia.

Agua ultrapura

En este trabajo, se considera agua ultrapura aquella que proviene de un equipo purificador EASYpure II, cuyo manual la clasifica como agua de tipo I según la norma ASTM. Este equipo debe ser alimentado con agua osmotizada, obtenida mediante un sistema de ósmosis inversa. En resumen, el proceso consiste en un sistema de ósmosis inversa seguido por un sistema de intercambio catiónico/aniónico.



Figura 2. Equipo purificador EASYpure II

Fuente: [6].

METODOLOGÍA

Por su finalidad, esta es una investigación aplicada, ya que busca contribuir con una metodología para evaluar la calidad del agua en laboratorios a partir de herramientas y métodos ya existentes.

Proceso de purificación del agua

Esta investigación se aplicó al sistema de purificación de agua de un instituto de educación superior en la carrera de Procesos Químicos y Metalúrgicos, cuyos laboratorios se abastecen de agua purificada.

El agua de alimentación proviene de una poza que pasa por un sistema de prefiltrado, con el fin de eliminar partículas de hasta 2 micras. Luego ingresa al sistema de ósmosis inversa (RO). El agua obtenida, a la que llamaremos «agua osmotizada», se almacena en un tanque para ser usada en los laboratorios de diversos cursos. Sin embargo, una parte de esta agua osmotizada ingresa al equipo purificador EASYpure II, que, mediante un sistema de intercambio iónico, proporciona agua ultrapura utilizada en los laboratorios de Química Analítica Instrumental [8].

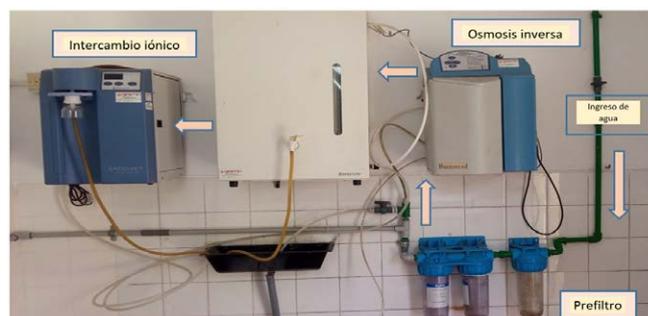


Figura 3. Sistema de purificación de agua para uso de laboratorios

Fuente: Elaboración propia.

Caracterización y muestreo

De acuerdo con los parámetros establecidos en las normas ISO 3696:1987 y ASTM D1193:2018, los manuales de los equipos de purificación y, sobre todo, la disponibilidad de equipos y reactivos químicos para realizar los análisis en el laboratorio de analítica, se planearon las siguientes mediciones y los muestreos que se llevarán a cabo según el plan siguiente.

Tabla 3
Plan de muestreo aplicado

Muestra de agua	Muestra puntual			Muestra compósito		
	Cantidad(L)	Frecuencia	Parámetros	Cantidad (L)	Frecuencia	Parámetros
Poza	200	3 veces / semana	1) Conductividad 2) Absorbancia 3) pH 4) Turbidez	300	100ml x 3 días/ semanal	1) Dureza total 2) Dureza Cálctica 3) Alcalinidad
Osmotizada	200	3 veces / semana	1) Conductividad 2) Absorbancia 3) pH 4) Turbidez	-	-	-
Ultrapura	200	3 veces / semana	1) Conductividad 2) Absorbancia 3) pH 4) Turbidez	-	-	-

RESULTADOS

Luego de aplicar los muestreos y análisis según lo planificado, se reportan los siguientes resultados obtenidos:

Tabla 4
Resultados del agua de poza

N.º	Fechas	Absorbancia (UA)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH	Dureza Total(mg/L)	Dureza Ca(mg/L)	Alcalinidad HCO3(mg/L)	ISL
1	12-Oct	0,001	619	310	0,69	7,41				
2	14-Oct	0,001	660	330	0,61	7,40	168	128	178	-0,01
3	17-Oct	0,001	570	285	0,72	7,30				
4	19-Oct	0,001	662	331	0,71	7,40				
5	21-Oct	0,001	653	327	0,51	7,31	326	122	191	0,03
6	24-Oct	0,001	670	335	0,76	7,31				
7	31-Oct	0,001	638	319	1,03	7,35				
8	2-Nov	0,001	642	321	0,74	7,20	162	118	178	0,19
9	4-Nov	0,001	697	349	0,43	7,55				
10	7-Nov	0,001	657	329	0,67	7,39				
11	9-Nov	0,001	674	337	1,91	7,72	164	102	28	-0,61
12	11-Nov	0,001	648	324	1,87	7,56				
Promedio:		0,001	649	325	0,89	7,41	205	118	144	-0,10

Fuente: Elaboración propia

- El manual del equipo establece los siguientes requisitos: SDT (sólidos disueltos totales) \leq 800 mg/L, turbidez \leq 1 NTU, pH de 3 a 10, y ISL (Índice de Saturación de Langelier) $<$ 1.
- Se observa que, en promedio, se cumplen las condiciones fisicoquímicas del agua de alimentación para el equipo de ósmosis.

Tabla 5
Resultados del agua osmotizada

Nro.	Fechas	Absorbancia (UA)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
1	12-Oct	0,000	14,02	7	0,31	5,62
2	14-Oct	0,000	14,36	7	0,32	5,89
3	17-Oct	0,000	16,43	8	0,33	6,09
4	19-Oct	0,000	15,65	8	0,24	5,99
5	21-Oct	0,000	18,93	9	0,36	6,12
6	24-Oct	0,000	22,50	11	0,16	6,03
7	31-Oct	0,000	33,70	17	0,24	5,95
8	2-Nov	0,000	18,70	9	0,2	6,75
9	4-Nov	0,000	18,24	9	0,27	5,87
10	7-Nov	0,000	25,60	13	0,3	5,87
11	9-Nov	0,000	25,4	13	0,21	6,56
12	11-Nov	0,000	20,22	10	0,33	6,3
Promedio:		0,000	20	10	0,27	6,09

Fuente: Elaboración propia

- Los resultados muestran que la conductividad promedio de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ supera los estándares de cualquier tipo de agua purificada y, además, presenta un incremento progresivo, lo cual sugiere que hay un problema en el proceso de purificación.

Tabla 6
Resultados del agua ultrapura

N.º	Fechas	Absorbancia (UA)	Conductividad (uS/cm)	SDT (mg/L)	Turbidez (NTU)	pH
1	12-Oct	0,000	1,57	1	0,23	5,12
2	14-Oct	0,000	1,82	1	0,17	5,82
3	17-Oct	0,000	1,76	1	0,21	5,69
4	19-Oct	0,000	0,45	0	0,24	5,50
5	21-Oct	0,000	1,18	1	0,28	5,90
6	24-Oct	0,000	0,74	0	0,15	5,99
7	31-Oct	0,000	1,74	1	0,22	7,32
8	2-Nov	0,000	1,22	1	0,18	5,18
9	4-Nov	0,000	0,92	0	0,21	6,60
10	7-Nov	0,000	1,98	1	0,26	6,07
11	9-Nov	0,000	1,95	1	0,25	7,60
12	11-Nov	0,000	1,6	1	0,22	5,20
Promedio:		0,000	1,4	1	0,22	6,00

Fuente: Elaboración propia.

- El valor promedio de la conductividad, de 1,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se aleja de los estándares de un agua tipo I, que según la norma ASTM D1193 debe ser $< 0,056 \mu\text{S}/\text{cm}$, y de un agua de grado 1, que según la norma ISO 3696 debe ser $< 0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$.
- El agua osmotizada obtenida no cumple con los criterios de calidad según las normas ISO 3696:1987 y ASTM D1193:2018. La conductividad tiene un valor promedio de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, cuando el máximo permitido debería ser 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- El equipo que proporciona agua ultrapura está generando un agua de grado 3 y tipo III según las normas, lo que sugiere que, al ser alimentado con agua osmotizada de baja calidad, se provoca la saturación del equipo y, por ende, su mal funcionamiento.
- Se concluye que la calidad del agua obtenida de ambos equipos de purificación no es la esperada, lo que indica la necesidad de realizar un mantenimiento correctivo de los equipos.

CONCLUSIONES

De la presente investigación aplicada se concluye lo siguiente:

- El agua de alimentación al equipo de ósmosis cumple con los parámetros que el fabricante recomienda para el correcto funcionamiento del equipo.

- Los laboratorios pueden usar la conductividad eléctrica como único parámetro de control de la calidad del agua, ya que es más sencilla de medir y permite detectar la presencia de iones provenientes de impurezas, como las sales inorgánicas disueltas en el agua purificada.

REFERENCIAS

- [1]** American Society for Testing and Materials. (2018). *Standard specification for reagent water (ASTM D1193: 2018)*.
- [2]** British Standard. (1987). *Specification for water for laboratory use (BS 3978: 1987)*.
- [3]** International Organization for Standardization. (1987). *Water for analytical laboratory use – Specification and test methods (ISO 3696: 1987)*.
- [4]** Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *Agua para uso en análisis de laboratorio. Especificaciones y método de ensayo (NC-ISO 3696: 2004)*.
- [5]** Martínez Guijarro, M. (2021). *Agua con fines analíticos: calidad y sistemas de producción*. Universitat Politècnica de València, 1-10. <https://riunet.upv.es/handle/10251/162397>
- [6]** Valdivia, R. & Pedro, S. (2010). Agua para uso en laboratorios. *Boletín Científico Técnico INIMET*, (1), 3-10. <https://www.redalyc.org/pdf/2230/223017807002.pdf>
- [7]** Thermo Fisher Scientific. (2010a). *EASYPure II Operating Manual (Rev. 0)*. <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LED/manuals/D01318~.pdf>
- [8]** Thermo Fisher Scientific. (2010b). *Diamond RO Operating Manual (Rev. 0)*. <https://www.apswater.com/images/diamond-ro-manual.pdf>

ACERCA DEL AUTOR

Iván Zacarías González Saavedra

Ingeniero químico por la Universidad Nacional del Callao (UNAC) con estudios de maestría en Gerencia de la Calidad y Desarrollo Humano de la Universidad Nacional del Callao (UNAC) y diplomado en Sistemas de Gestión de la Calidad en Laboratorios según ISO/IEC 17025 por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

Posee experiencia profesional en el área de aseguramiento de la calidad en la industria de procesos y docente en los cursos de Química General (teoría y laboratorio), Físicoquímica, Operaciones Industriales, Matemática Aplicada y Química Analítica Clásica e Instrumental. También, tiene experiencia en sistemas de gestión de calidad, seguridad y medioambiente en la industria de procesos químicos.

@ igonzales@tecsup.edu.pe

@ ivanchemical2007@yahoo.com

Cristian Sánchez Ríos

Egresado de la carrera de Procesos Químicos y Metalúrgicos del instituto Superior Tecnológico Tecsup, con experiencia en análisis químico clásico e instrumental, actualmente se encuentra trabajando en un laboratorio de análisis químico acreditado con la norma ISO/IEC 17025 por el Instituto Nacional de Calidad (Inacal).



Recibido: 23-02-24
 Revisado: 10-09-24
 Aceptado: 24-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.



ESCUELA DE
OPERADORES
TECSUP

TU FUERZA ES EL MOTOR QUE IMPULSA AL PAÍS



Lidera el manejo de equipos
pesados con la mejor
formación técnica



Instructores expertos en
operación y enseñanza



Enseñanza personalizada
necesaria para un mercado
de alta demanda laboral



Práctica con equipo real y
simuladores con tecnología
de última generación



Certificado a nombre de
Tecsup con respaldo de
Ferreyros* En máquinas
seleccionadas*

Sé el operador que las industrias necesitan



945 044 556 / 938 105 348

www.tecsup.edu.pe/escuela-de-operadores

Implementación de una conexión remota y segura utilizando herramientas disponibles en el mercado y su aceptación en el proceso de enseñanza-aprendizaje



Acceso remoto a laboratorios de informática como facilitador del aprendizaje activo en carreras técnicas

Remote Access to Computer Laboratories as a Facilitator of Active Learning in Technical Careers

RESUMEN

El estudio se centra en la implementación de un servicio de acceso remoto a laboratorios de informática para mejorar el aprendizaje teórico-práctico en entornos educativos técnicos. El objetivo general es contribuir a la implementación de una conexión remota y segura utilizando herramientas disponibles en el mercado y su aceptación en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Para lograrlo, se plantean objetivos específicos, como desplegar una solución eficiente, analizar la eficacia del acceso remoto e identificar desafíos y oportunidades asociados. El alcance del estudio se limita a estudiantes y docentes de carreras técnicas de informática en instituciones educativas específicas, recopilando datos cuantitativos y cualitativos para comprender completamente el tema.

La metodología empleada incluye encuestas, entrevistas semiestructuradas, análisis de datos académicos y revisión bibliográfica. Estos métodos permiten recopilar percepciones, experiencias y opiniones, así como comparar el rendimiento académico de los estudiantes que utilizan el acceso remoto y aquellos estudiantes que no lo hacen. Se espera que los resultados muestren un aumento en la participación estudiantil, mejoras en el rendimiento académico y una mayor satisfacción con la experiencia educativa. Además, se anticipa identificar áreas de mejora y recomendaciones para la implementación efectiva del acceso remoto en entornos educativos técnicos.

En cuanto a los hallazgos principales, se espera que el estudio proporcione una visión detallada de cómo el acceso remoto puede mejorar el aprendizaje activo en carreras técnicas, así como identificar áreas de mejora y recomendaciones para su implementación efectiva. Las conclusiones resaltan la importancia del acceso remoto como una herramienta efectiva para facilitar el aprendizaje en carreras técnicas, así como la necesidad de mejorar su implementación para maximizar sus beneficios.

ABSTRACT

The study focuses on the implementation of a remote access service to computer laboratories to improve theoretical-practical learning in technical educational environments. The general objective is to contribute to the implementation of a remote and secure connection using tools available on the market and their acceptance in the teaching-learning process. To achieve this, specific objectives are set, such as deploying an efficient solution, analyzing the effectiveness of remote access, and identifying associated challenges and opportunities. The scope of the study is limited to students and teachers of technical computer science courses at specific educational institutions, collecting quantitative and qualitative data to fully understand the topic.

The methodology used includes surveys, semi-structured interviews, analysis of academic data and literature review. These methods allow us to collect perceptions, experiences and opinions, as well as compare the academic performance of students who use remote access and those students who do not. Results are expected to show an increase in student engagement, improvements in academic performance, and greater satisfaction with the educational experience. Additionally, it is anticipated to identify areas of improvement and recommendations for the effective implementation of remote access in technical educational environments.

Regarding the main findings, the study is expected to provide a detailed view of how remote access can improve active learning in technical careers, as well as identify areas of improvement and recommendations for their effective implementation. The conclusions highlight the importance of remote access as an effective tool to facilitate learning in technical careers, as well as the need to improve its implementation to maximize its benefits.



Palabras Claves

Acceso remoto, laboratorios remotos de informática, conexión remota, aprendizaje teórico-práctico.

Key words

Remote access, Remote computer laboratories, Remote connection, Theoretical-practical learning.

INTRODUCCIÓN

Los laboratorios de informática son un recurso importante para las organizaciones [3] y para la formación de estudiantes en diversas carreras tecnológicas. Este trabajo se centra en implementar una solución que proporcione acceso remoto a estos recursos educativos.

Durante la pandemia de coronavirus, la importancia de los laboratorios remotos se evidenció cuando las universidades cerraron sus puertas debido a la emergencia sanitaria [7], lo que presentó una oportunidad para desarrollar una solución que cubriera esta necesidad y, a futuro, como una característica en las modalidades semipresenciales.

El uso de laboratorios virtuales y remotos es fundamental para adquirir habilidades prácticas en la educación a distancia, donde no existe interacción física entre estudiantes y profesores [4]. Por lo tanto, gestionar una herramienta de educación virtual eficaz es crucial para brindar un servicio de calidad.

La computación ha abierto nuevas posibilidades en los laboratorios de instrucción, incluyendo simulación, adquisición automatizada de datos, control remoto de instrumentos, y análisis y presentación rápida de información [5]. Por ello, es fundamental que las instituciones educativas cuenten con un equipamiento adecuado de *hardware* y *software* para facilitar el proceso de enseñanza.

Actualmente, las computadoras están en todas partes y se han convertido en herramientas esenciales para cualquier profesional [8]; sin embargo, no todos los estudiantes cuentan con un equipo personal compatible con el *software* necesario para su formación.

La llegada de Internet y el desarrollo de potentes programas de simulación, junto con el incremento en la capacidad y accesibilidad de la potencia informática, han reorientado la atención hacia los laboratorios [5]. Este trabajo se centra en utilizar las herramientas disponibles en el mercado para presentar una solución integral en la gestión del acceso remoto a los laboratorios de computación, aprovechando los recursos de *hardware* y *software* ya instalados.

- Definir los requisitos mínimos para el acceso remoto a los laboratorios de cómputo.
- Implementar un sistema de acceso remoto a los laboratorios de cómputo utilizando *software* existente.
- Desarrollar un sistema de gestión de acceso a los laboratorios de cómputo.
- Medir el uso de la solución implementada.

FUNDAMENTOS

OsTicket es una herramienta de código abierto ampliamente utilizada en la gestión de soporte y solicitudes en diversas organizaciones, incluidas instituciones de educación superior tecnológica. Su facilidad de uso, flexibilidad y costo cero lo convierten en una opción atractiva para instituciones que buscan mejorar la gestión de sus servicios de soporte [6].

Deep Freeze es una solución de *software* desarrollada por la empresa canadiense Faronics que permite a los administradores

de sistemas proteger la configuración y el estado de los sistemas operativos, revirtiendo cualquier cambio realizado por los usuarios al reiniciar el equipo. En el ámbito de la educación superior tecnológica, Deep Freeze se utiliza ampliamente para mantener la integridad de los laboratorios de computación y las aulas informáticas. Al restaurar automáticamente el sistema a su configuración predeterminada, garantiza un entorno de aprendizaje estable y predecible para los estudiantes, facilitando la gestión de TI para los administradores.

Anydesk es un *software* de escritorio remoto que permite a los usuarios acceder y controlar computadoras a distancia de manera segura y eficiente. En el ámbito de la educación superior tecnológica, AnyDesk facilita el acceso remoto a recursos del campus, como laboratorios de computación y *software* especializado, permitiendo que estudiantes y profesores trabajen desde cualquier lugar. Esta herramienta ha sido esencial para implementar modelos de aprendizaje híbrido y a distancia, especialmente durante la pandemia de COVID-19, cuando muchas instituciones educativas adoptaron soluciones tecnológicas para continuar sus operaciones [1].

Google Calendar es un servicio de administración de calendarios en la nube desarrollado por Google, que permite a los usuarios crear, gestionar y compartir eventos. Este servicio es accesible a través de APIs, lo que facilita su integración con diversas aplicaciones y servicios, incluyendo la planificación y el soporte técnico en redes corporativas. Los usuarios pueden crear eventos con metadatos adicionales, como descripciones, ubicaciones y recordatorios, y compartirlos con otros usuarios, configurando niveles de acceso específicos. La API de Google Calendar permite automatizar estas tareas e integrar eventos en sistemas como herramientas de soporte técnico (HelpDesk y ServiceDesk), mejorando la coordinación y resolución de problemas en redes grandes y distribuidas geográficamente [2].

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la solución, se utiliza la metodología de Investigación-Acción, dividiendo el trabajo en 5 fases.

Primera fase: Identificación de problemas y necesidades

En esta fase, se identifica el acceso remoto a los laboratorios de cómputo como un desafío crucial a resolver. Se considera que muchos laboratorios utilizan *software* con licencia y requieren recursos de cómputo avanzados, los cuales no todos los estudiantes tienen en sus dispositivos personales. Esta identificación se realiza mediante la colaboración con estudiantes y profesores para comprender mejor las limitaciones y necesidades específicas relacionadas con el acceso remoto a estos recursos tecnológicos esenciales.

Segunda fase: Desarrollo de la solución

En esta etapa, se consideran los activos existentes de la institución, como el *software* instalado, los equipos de alta gama, la capacidad del laboratorio y el ancho de banda disponible. Se elabora un diagrama de flujo (figura 1) que muestra los componentes involucrados en la solución. Este diagrama facilita la visualización y la comprensión de cómo interactúan estos activos para soportar el acceso remoto y garantizar un rendimiento óptimo.

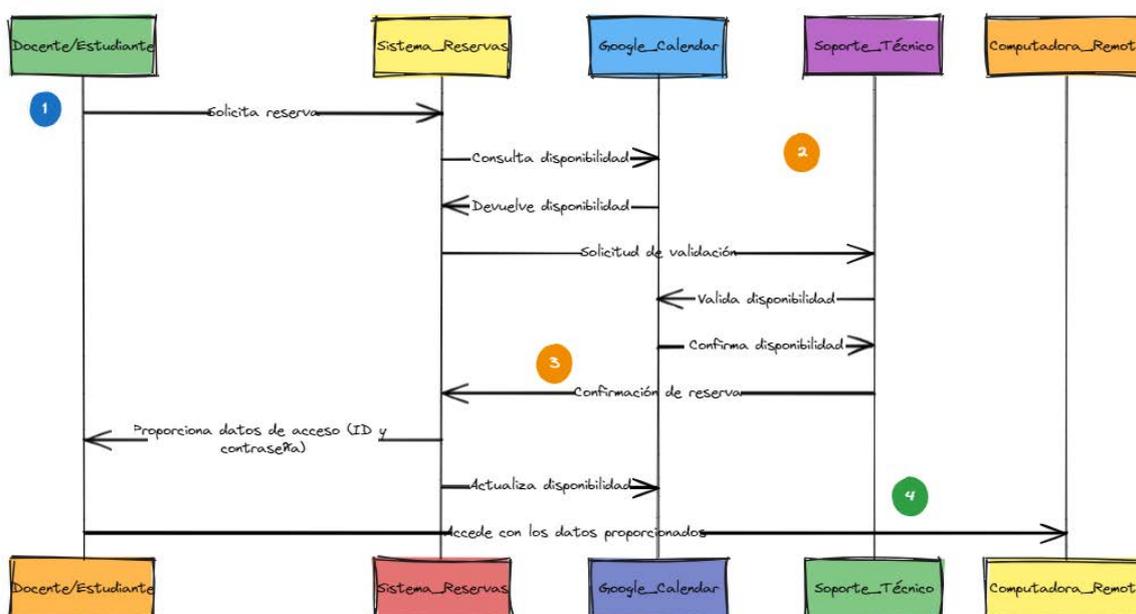


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema de reserva

Nota. El diagrama ilustra los 4 pasos necesarios para acceder a una computadora del laboratorio de cómputo.

Tercera fase: Implementación y acción

En la implementación de la solución, se identificó la necesidad de utilizar el protocolo Wake-on-LAN para encender los equipos de forma remota. Además, es fundamental agregar una tarea programada en cada equipo para que, tras el reinicio, la contraseña privada se cambie automáticamente a una pública. Esto garantiza que los estudiantes puedan acceder de manera segura y eficiente a los recursos del laboratorio sin intervención manual, facilitando el uso continuo y seguro de los equipos.

Cuarta fase: Observación y evaluación

Se realiza un monitoreo continuo para identificar y aplicar los ajustes necesarios que puedan mejorar el aprendizaje de los estudiantes. Este proceso permite observar el uso de la infraestructura tecnológica y maximizar su eficiencia. Al asegurar la disponibilidad remota de los equipos al 100 % de su capacidad, se optimiza significativamente el acceso a recursos computacionales avanzados, brindando a los estudiantes las herramientas necesarias para sus actividades académicas en cualquier momento. Este enfoque garantiza una utilización óptima de los recursos y mejora la experiencia educativa.

Quinta fase: Mejora continua

A partir del *feedback* de los estudiantes, se puede ampliar el horario de reservas, previa aprobación del docente, para

maximizar el uso de las horas disponibles en los laboratorios remotos. Además, se permite la conexión de equipos propios a la misma red, facilitando su acceso desde la computadora controlada de forma remota. Esta flexibilidad en el horario y la conectividad mejora significativamente la disponibilidad y el aprovechamiento de los recursos, proporcionando a los estudiantes mayor autonomía y accesibilidad para completar sus tareas y proyectos en cualquier momento, optimizando así su experiencia de aprendizaje.

RESULTADOS

- Describir la contribución del estudio, resaltando la información relevante a los objetivos de manera clara y coherente.
- Mencionar los hallazgos significativos, incluyendo aquellos que contradigan la hipótesis.

Como resultado, se validó el ancho de banda que consume una conexión remota al laboratorio de computación utilizando el *software* NetWorx. Esta herramienta permitió comprobar que, para este tipo de conexión, es necesario un ancho de banda superior a 4 Mbps. En la figura 2 se observan los picos alcanzados al inicio de la conexión y cómo se estabiliza en una velocidad promedio de 2 Mbps, mientras se ejecutan en la computadora remota dos ventanas de YouTube, tres ventanas de navegación por internet y dos máquinas virtuales en VMware Workstation.

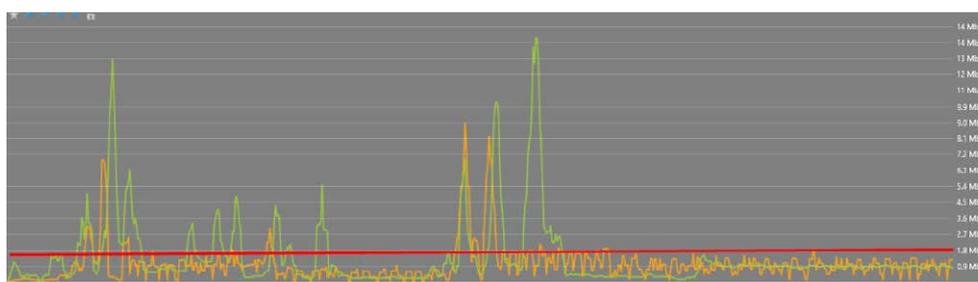


Figura 2. Diagrama de flujo del sistema de reserva

Nota. Ancho de banda consumido por una conexión remota.

La figura 3 muestra que el consumo de memoria en la PC del estudiante es de solo 249 megabytes para ejecutar el programa,

lo que evidencia la eficiencia del *software* en términos de uso de memoria.

Procesos		Ejecutar nueva tarea	Finalizar tarea	Modo de eficiencia	
Nombre	Estado	7% CPU	51% Memoria	0% Disco	0% Red
Aplicaciones (7)					
> 1 489 539 262 - AnyDesk (32 bits)		0.1%	249.3 MB	0 MB/s	0 Mbps

Figura 3. Consumo de memoria

Nota. Memoria consumida por el *software* de acceso remoto.

La figura 4 muestra los distintos actores involucrados en el proceso de reserva de acceso a una computadora dentro del laboratorio de cómputo.

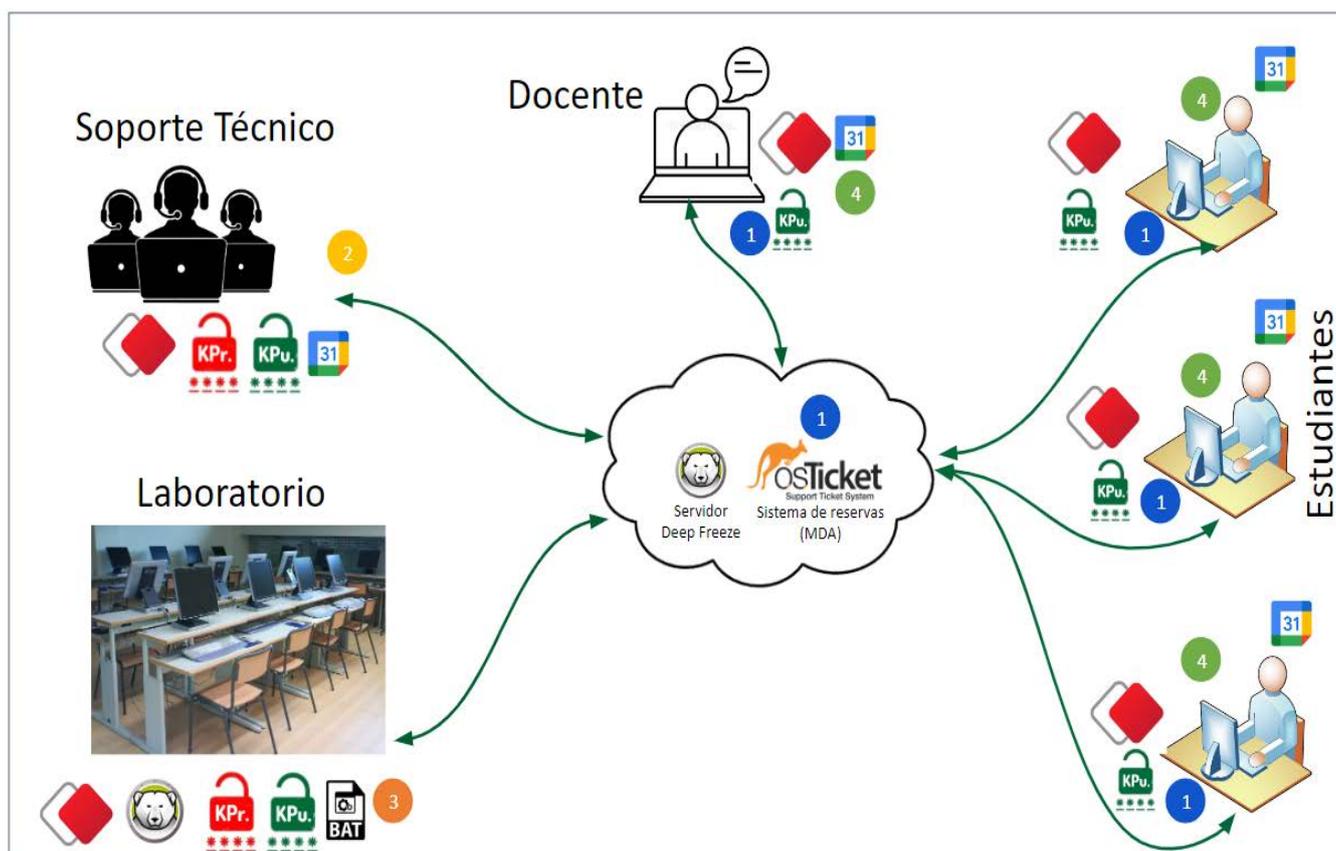


Figura 4. Diagrama de involucrados en el proceso de reserva y acceso a una computadora del laboratorio de computación

Nota. La figura representa los cuatro pasos para acceder a una computadora del laboratorio de cómputo.

Reserva: La solicitud de reserva puede ser realizada por el docente o el estudiante a través del sistema de reservas OsTicket, consultando previamente la disponibilidad del laboratorio publicada en Google Calendar.

3. Confirmación: El personal de soporte confirma la reserva en OsTicket, proporcionando los datos de acceso (ID y contraseña), y actualiza el ticket de reserva y la disponibilidad en Google Calendar.

1. Reserva: La solicitud de reserva puede ser realizada por el docente o el estudiante a través del sistema de reservas OsTicket, consultando previamente la disponibilidad del laboratorio publicada en Google Calendar.

4. Conexión: El docente o estudiante accede a la computadora de forma remota utilizando los datos proporcionados por el personal de soporte técnico.

2. Validación: El personal de soporte técnico valida la disponibilidad de los laboratorios en Google Calendar.

La gestión de acceso a los laboratorios de cómputo se controla mediante OsTicket como herramienta de mesa de ayuda, centralizando las solicitudes de estudiantes y

docentes. Esta herramienta incluye un formulario configurado para especificar el laboratorio, el número de computadoras,

la hora y la frecuencia con que se desea reservar el acceso al laboratorio.



Figura 5. Home page del sistema de reservas

Nota. Página principal del sistema de tickets gestionado por la plataforma de OsTicket.

- Medir el uso de la solución.

El proyecto, desarrollado entre abril de 2020 y diciembre de 2022, habilitó seis laboratorios con un total de 128 computadoras. La figura 6 muestra la distribución de estas

computadoras por laboratorio, permitiendo un acceso amplio a los recursos tecnológicos. La planificación y ejecución garantizaron una distribución y disponibilidad adecuadas de los equipos, resaltando la organización y efectividad del proyecto.

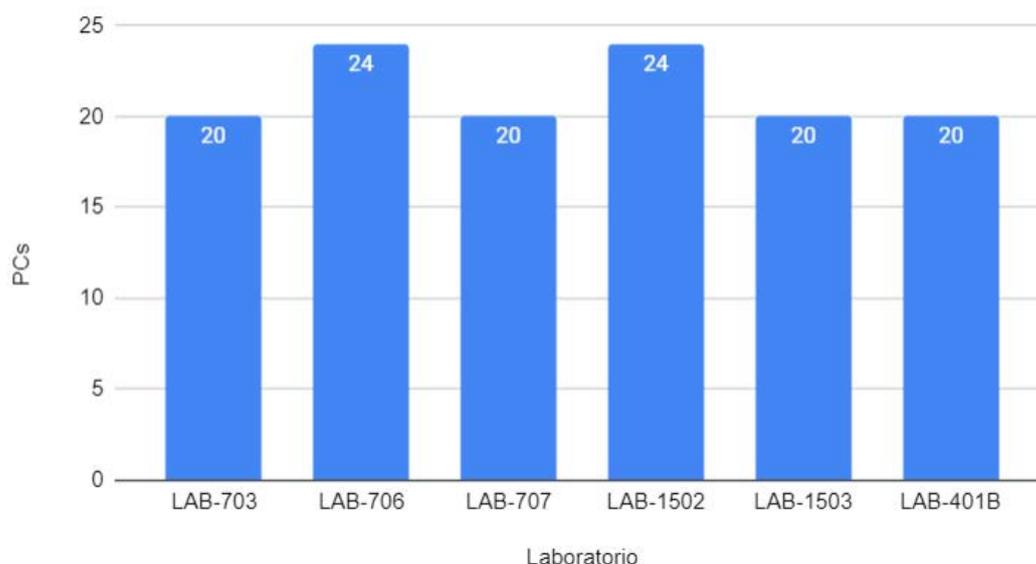


Figura 6. Gráfico de barras con computadoras por laboratorio

Durante este periodo, la frecuencia de uso de las reservas mensuales aumenta notablemente en los meses de clases. La figura 7 muestra que los meses de menor uso corresponden al inicio y final de cada semestre, reflejando la variación en la

demanda de recursos a lo largo del año académico. Este patrón destaca la diferencia en el uso de los laboratorios y coincide con los ciclos de actividad académica.

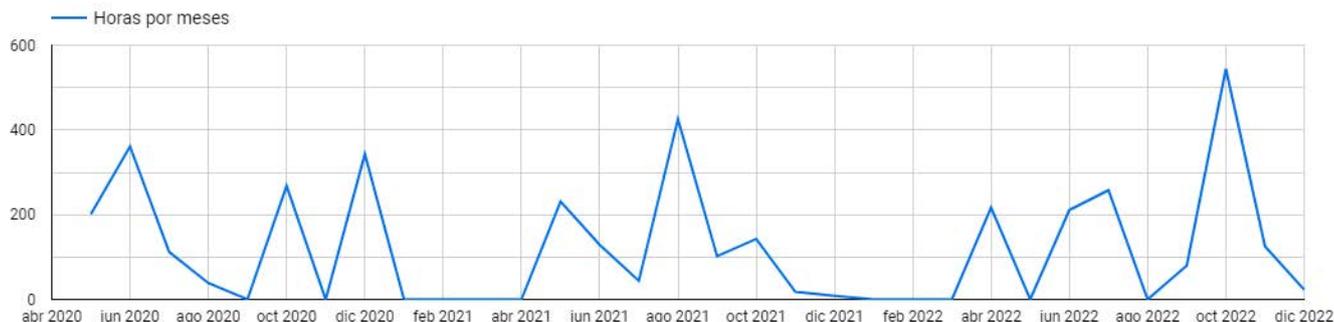


Figura 7. Gráfico de frecuencias de uso de los laboratorios

La figura 8 muestra un recuento de los equipos reservados, agrupados por laboratorio. Destaca que el laboratorio de virtualización es el más utilizado por estudiantes y docentes, lo que sugiere una alta demanda de recursos y capacidades de

virtualización. La frecuencia de uso en este laboratorio supera considerablemente a la de los demás, subrayando la importancia de optimizar los recursos y el software desplegados en sus equipos.

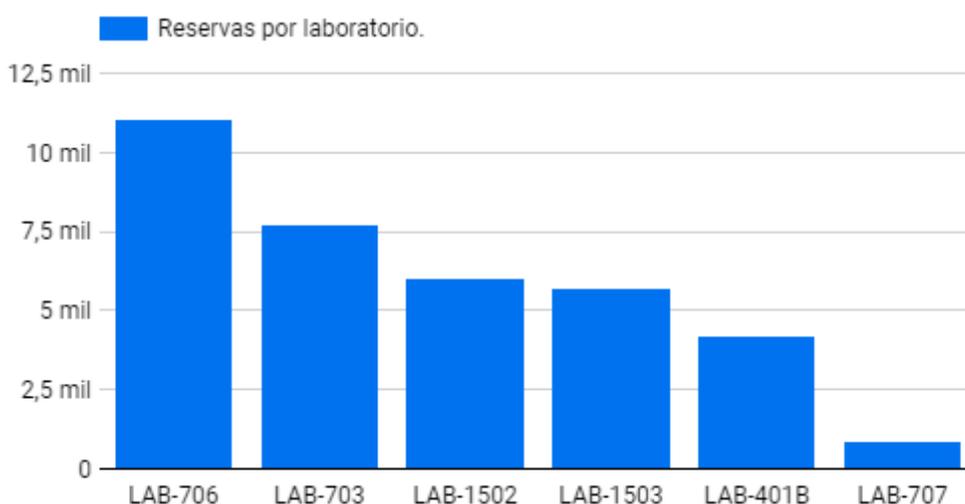


Figura 8. Gráfico de barras de reservas por laboratorio

Para validar el nivel de satisfacción con la solución, se realizó una encuesta a los estudiantes. Los resultados muestran que un 52 % está satisfecho, un 20 % muy satisfecho y un 28 % se mantiene

neutral. Por lo tanto, el nivel de satisfacción general se estima en un 72 %. Este alto porcentaje refleja una aceptación positiva de la solución implementada, como se muestra en la figura.

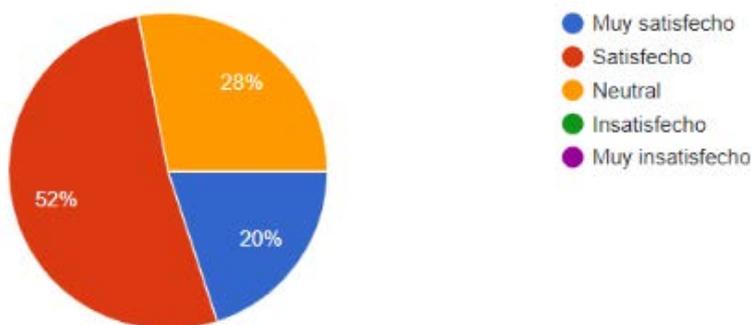


Figura 9. Nivel de satisfacción con la facilidad de acceso remoto

CONCLUSIONES

Para el acceso remoto a los laboratorios de cómputo, se requiere un ancho de banda mínimo de 4 Mbps para asegurar una conexión estable y eficiente. Este requisito se estableció a partir de pruebas con *software* como NetWorx, que demostró la necesidad de esta capacidad para mantener un rendimiento adecuado al usar múltiples recursos simultáneamente, como aplicaciones de navegación y máquinas virtuales.

Se implementó exitosamente un sistema de acceso remoto utilizando herramientas como OsTicket, AnyDesk y Google Calendar, que permitieron gestionar eficientemente las reservas y accesos a los laboratorios. La solución integró el *software* existente, facilitando un acceso seguro y controlado a los recursos computacionales, lo cual fue crucial para asegurar la continuidad del aprendizaje en entornos técnicos y educativos durante la pandemia.

La implementación del sistema de gestión de acceso a través de OsTicket centralizó las solicitudes y optimizó la coordinación entre estudiantes, docentes y personal técnico. Esta centralización mejoró significativamente la gestión de los recursos, permitiendo un uso más eficiente de los laboratorios y asegurando que las necesidades de los usuarios fueran atendidas de manera oportuna y organizada.

Se observó un aumento significativo en la frecuencia de uso de las reservas mensuales de los laboratorios durante los períodos de clase, evidenciando una alta demanda y aceptación de la solución implementada. Además, la encuesta de satisfacción mostró que un 72 % de los estudiantes se declaró satisfecho o muy satisfecho con el sistema, lo que refleja la efectividad de la solución en mejorar el acceso y uso de los recursos tecnológicos en el contexto de la educación técnica.

REFERENCIAS

- [1] AnyDesk. (2021). *Remote access & support for educational facilities*. AnyDesk.
- [2] Balyk, N., Oleksiuk, V. & Halas, A. (2020, noviembre). Development a computer network user support tool. *CEUR Workshop Proceedings*.
- [3] Bastidas, C. (2011). Enabling remote access to computer networking laboratories for distance education. *2011 Frontiers in Education Conference (FIE)*, F3C-1-F3C-6. <https://doi.org/10.1109/FIE.2011.6142731>
- [4] Caminero, A. *et al.* (2016). VirTual remoTe labORatories Management System (TUTORES): Using cloud computing to acquire university practical skills. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 9(2), 133-145. <https://doi.org/10.1109/TLT.2015.2470683>
- [5] Feisel, L. & Rosa, A. (2005). The role of the laboratory in undergraduate engineering education. *Journal of*

Engineering Education, 94(1), 121-130. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x>

- [6] GitHub. (2024). *osTicket: The osTicket open source ticketing system official project repository*. GitHub. <https://github.com/osTicket/osTicket>
- [7] Kiyomarsi, F. & Alkabool, A. (2023). An online virtual laboratory model based on the Internet of Things for use in the field of renewable energy. *Applied Computing Journal*, 265-271. <https://doi.org/10.52098/acj.2023321>
- [8] May, D., Jahnke, I. & Moore, S. (2023). Online laboratories and virtual experimentation in higher education from a sociotechnical-pedagogical design perspective. *Journal of Computing in Higher Education*, 35(2), 203-222. <https://doi.org/10.1007/s12528-023-09380-3>

ACERCA DE LOS AUTORES

Godofredo Teobaldo Díaz Espinoza

Docente en Tecsup en la carrera de Diseño de Software e Integración de Sistemas en Tecnologías Emergentes, Desarrollo de soluciones en la Nube y Gestión de Servicios.

Con más de 15 años de experiencia en tecnologías de información, con certificación en Gestión de Servicios.

@gdiaz@tecsup.edu.pe

Jaime Moshe Farfán Madariaga

Docente en la carrera de Diseño de Software e Integración de Sistemas en Tecsup.

Docente en UTEC (Universidad de Ingeniería y Tecnología) en Ciencia de la Computación y Electrónica, desarrollando proyectos con tecnologías Python, Android, IOS, Arduino, Realidad Aumentada, Kinect, Cloud Computing, Cognitive Computing. Aplicaciones de alta disponibilidad.

Consultor con 21 años de experiencia en tecnologías de información, con certificación en base de datos Oracle, arquitecto de *software*. Experiencia en *startups* y desarrollo de proyectos.

@jfarfan@tecsup.edu.pe

Recibido: 26-04-24
Revisado: 04-09-24
Aceptado: 17-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

Tecsup

Sede Norte

Mz. A Sub lote 1 Urbanización Tecsup
Víctor Larco Herrera, Trujillo - Perú
informestrujillo@tecsup.edu.pe

T. (044) 485420

Sede Centro

Av. Cascanueces 2221
Santa Anita, Lima - Perú
informeslima@tecsup.edu.pe

T. (51-1) 317-3900

Sede Sur

Urb. Monterrey Lote D-8
José Luis Bustamante y Rivero,
Arequipa - Perú
informesarequipa@tecsup.edu.pe

T. (54) 426610

F. (54) 426654

www.tecsup.edu.pe

