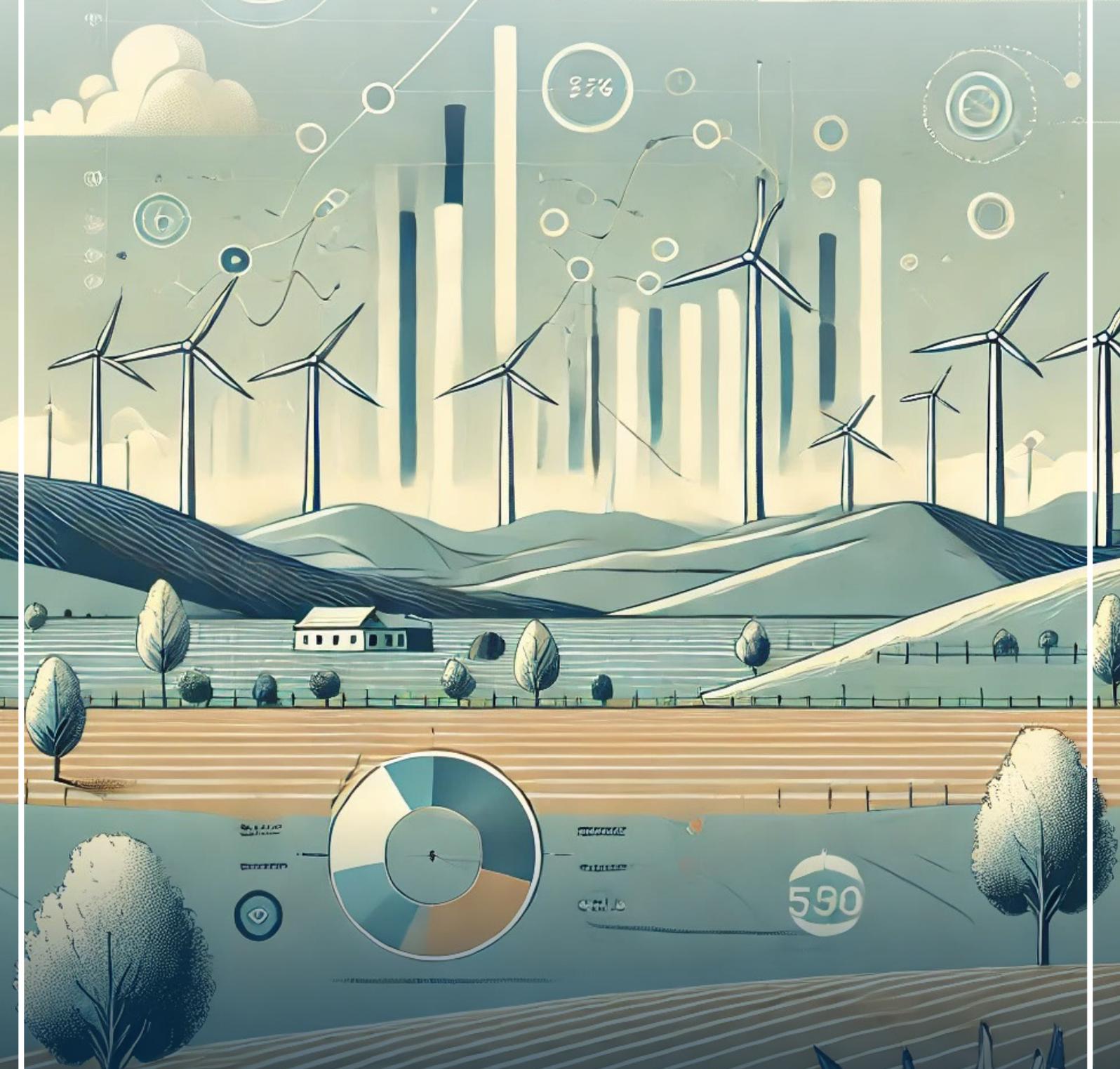




REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 54, Nro. 1, Agosto · Octubre 2024



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 54, Nro. 1, Agosto · Octubre 2024



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec

TEMÁTICA Y ALCANCE

La Revista Politécnica es una publicación periódica trimestral editada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador, creada en el año 1961, siendo la primera revista científica ecuatoriana, cuyo objetivo es contribuir al conocimiento científico y tecnológico, mediante la publicación de estudios científicos relacionados con las áreas de ciencias básicas (Física, Química, Biología y Matemática) e ingenierías (Química y Agroindustria, Civil y Ambiental, Eléctrica y Electrónica, Geología y Petróleos, Mecánica, y Sistemas). La Revista Politécnica está dirigida a profesionales e investigadores que trabajan en estos campos del conocimiento.

EDITORORA

Jenny Gabriela Torres, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
editor.rp@epn.edu.ec

CO-EDITOR

Luis Alberto Morales, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional
coeditor.rp@epn.edu.ec

CONSEJO EDITORIAL

Ph.D. José Aguilar
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Víctor Hugo Hidalgo
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. José Luis Paz
Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú

Ph.D. Hernán Álvarez
Universidad Nacional Colombia, Colombia

Ph.D. Majid Khorami (C)
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Nelson Pérez
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Santiago Arellano Chalmers
University of Technology, Suecia

Ph.D. Hugo Leiva
Yachay Tech University, Ecuador

Ph.D. Franklin Rivas
Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile

Ph.D. Carlos Ávila
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Francisco León
Universidad de los Andes, Venezuela

Ph.D. Andrés Rosales
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Leonardo Basile
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Orestes Llanes
Universidad Tecnológica de la Habana, Cuba
Organización Latinoamericana de Energía, Ecuador

Ph.D. Gabriel Salazar

Ph.D. Silvia Calderón
Finnish Meteorological Institute, Finlandia

Ph.D. Wilfrido A. Moreno
University of South Florida, Estados Unidos

Ph.D. Gustavo Scaglia
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Ph.D. Eduardo F. Camacho
Universidad de Sevilla, España

Ph.D. Diego Ordóñez
Universidad Tecnológica Equinoccial, Ecuador

Ph.D. Hebert Sira-Ramirez
Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute, México

Ph.D. Juan Carlos De los Reyes
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Rui Pedro Paiva
University of Coimbra, Portugal

Ph.D. Sebastián Taco
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

Ph.D. Pamela Flores
Escuela Politécnica Nacional, Ecuador

La Revista Politécnica está incluida en diferentes índices, siendo los principales SCOPUS, Scientific Electronic Library Online (SciELO), Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), Catálogo 2.0 de Latindex, Directory of Open Access Journals (DOAJ).

Se autoriza la reproducción total o parcial de su contenido siempre y cuando se cite la fuente. Los conceptos expresados son de responsabilidad exclusiva de sus autores.

Coordinador Técnico Operativo

Ing. Ricardo Villarroel
ricardo.villarroel@epn.edu.ec

MSc. Karina Játiva
karina.jativa@epn.edu.ec

Proofreader

MSc. María Eufemia
Torres

Diseño de Portada

Cristian Basurto
Diseñador Gráfico

AUTORIDADES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**Vicerrector de Investigación,
Innovación y Vinculación**
Marco Santórum, Ph.D.

Rector
Tarquino Sánchez, Ph.D.

Vicerrectora de Docencia
Valentina Ramos, Ph.D.

Cambio climático y ciencia

El 24 de octubre se celebra el Día Internacional del Cambio Climático. En este contexto, es importante destacar que la crisis climática ha alcanzado dimensiones globales, convirtiéndose en uno de los desafíos más urgentes de nuestro tiempo. Este día no solo marca una oportunidad para reflexionar sobre los impactos del cambio climático, sino también para reafirmar nuestro compromiso, como académicos e investigadores, hacia plantear, investigar y proponer soluciones efectivas y sostenibles.

El cambio climático, impulsado en gran parte por todas las actividades humanas, está alterando los patrones climáticos globales y afectando la biodiversidad, los ecosistemas y las comunidades en todo el mundo. Los informes científicos y las evidencias empíricas son claros: la temperatura global sigue aumentando, los fenómenos meteorológicos extremos se están volviendo más frecuentes, y el nivel del mar está subiendo a un ritmo alarmante.

Ante esta problemática surge la necesidad de una acción coordinada. No basta con reconocer la gravedad del problema; es esencial que gobiernos, universidades, empresas, comunidades y ciudadanos trabajen juntos para implementar soluciones efectivas. La transición hacia fuentes de energía renovables, la adopción de prácticas sostenibles en la agricultura y la promoción de tecnologías limpias representan pilares fundamentales en la lucha contra el cambio climático y el desarrollo de un futuro más sostenible. Estas acciones no solo ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también fomentan un uso más eficiente de los recursos naturales, contribuyendo a la preservación del medio ambiente y al bienestar de las generaciones futuras.

La innovación y el conocimiento son nuestros mejores aliados en esta lucha. Es imperativo que la investigación científica y la ingeniería contribuyan a desarrollar nuevas tecnologías y enfoques que reduzcan las emisiones de carbono. Asimismo, es fundamental que la educación, la divulgación de la investigación en estos aspectos y la conciencia pública se fortalezcan para impulsar un cambio de mentalidad en nuestra forma de vivir.

En el marco del Día Internacional del Cambio Climático, la Revista Politécnica presenta un nuevo volumen que incluye a cinco de sus diez artículos que están relacionados con alternativas para reducir el impacto ambiental del ser humano en la naturaleza, como el uso de materiales reciclados para la elaboración de concreto, generación de modelos matemáticos que optimizan la energía eólica, desarrollo de fuentes alternativas de energía renovable para dispositivos electrónicos portátiles y el estudio de herramientas de optimización de parámetros y condiciones operativas de sistemas fotovoltaicos.

El Consejo Editorial Revista Politécnica hace un llamado a lectores y a la sociedad en general para que asuman un rol activo contra el cambio climático. Cada acción cuenta, y cada decisión tomada puede marcar una diferencia significativa. Solo con un esfuerzo conjunto y sostenido se logrará la protección de nuestro planeta para las generaciones futuras. Los invitamos a explorar los artículos de este volumen y a reflexionar sobre cómo pueden contribuir al cambio necesario. La crisis climática no es un problema distante; es un desafío inmediato que requiere nuestra atención y acción decidida.

Climate change and science

October 24 marks the International Day of Climate Change. In this context, it is important to highlight that the climate crisis has reached global dimensions, becoming one of the most urgent challenges of our time. This day not only marks an opportunity to reflect on the impacts of climate change, but also to reaffirm our commitment, as academics and researchers, towards raising, investigating and proposing effective and sustainable solutions.

Climate change, driven in large part by all human activities, is altering global weather patterns and affecting biodiversity, ecosystems and communities around the world. Scientific reports and empirical evidence are clear: global temperatures continue to rise, extreme weather events are becoming more frequent, and sea levels are rising at an alarming rate.

Faced with this problem, there is a need for coordinated actions. It is not enough to recognize the seriousness of the problem; it is essential that governments, universities, businesses, communities and citizens work together to implement effective solutions. The transition to renewable energy sources, the adoption of sustainable practices in agriculture and the promotion of clean technologies represent fundamental pillars in the fight against climate change and the development of a more sustainable future. These actions not only help to reduce greenhouse gas emissions, but also promote a more efficient use of natural resources, contributing to the preservation of the environment and the well-being of future generations.

Innovation and knowledge are our best allies in this fight. It is imperative that scientific research and engineering contribute to developing new technologies and approaches that reduce our carbon emissions. It is also essential that education, dissemination of research in these aspects and public awareness be strengthened to drive a change in the way we live.

In the framework of the International Day of Climate Change, the Revista Politécnica presents a new volume that includes five of its ten articles related to alternatives to reduce the environmental impact of human beings on nature, such as the use of recycled materials for the production of concrete, the generation of mathematical models that optimize wind energy, the development of alternative sources of renewable energy for portable electronic devices and the study of tools for the optimization of parameters and operating conditions of photovoltaic systems.

The Editorial Board of Revista Politécnica calls on readers and society in general to take an active role against climate change. Every action counts, and every decision taken can make a significant difference. Only a joint and sustained effort will protect our planet for future generations. We invite you to explore the articles in this volume and reflect on how you can contribute to the necessary change. The climate crisis is not a distant problem; it is an immediate challenge that requires our attention and determined action.

Contenido
Vol. 54, No. 1
Agosto – Octubre 2024

7

Quispe, Reynaldo; Huamani, Renzon

**Modelos Autorregresivos para Predecir la Velocidad del Viento en la Zona Rural
Socabaya de Perú, 2022**

Autoregressive Models for Forecasting Wind Speed in the Rural Area of Socabaya, Peru, 2022

15

Gallegos, Álvaro; Ulquiango, Oscar; Lima, Paulina

**Comportamiento Hidráulico del Flujo en el Modelo Numérico de un Disipador de Energía
Tipo Vórtice**

Hydraulic Flow Behavior in the Numerical Model of a Vortex Energy Sink

25

Rodríguez, Martín; Baes, Mario; Jara, Ricardo; López, Yadira; Orozco, Santos

**Closed-loop Speed Control for a Three-Phase Alternating-Current Motor using a Modbus
Network**

*Control de Velocidad en Malla Cerrada para un Motor de Corriente Alterna Trifásico
utilizando una Red Modbus*

33

Flores Berenguer, Isaida; González Haramboure, Yoermes; García Tristá, Jenny; Rosete Suárez, Alejandro

Artificial Neural Network Model to Predict the Factor of Safety in Earth Dams Subjected to Rapid Drawdown

Modelo de Redes Neuronales Artificiales para Predecir el Factor de Seguridad en Presas de Tierra Sometidas a Desembalse Rápido

45

Montenegro, Valery; Hernández, Delvis; Domínguez, Anmary; Vergara, Fidedigna;

Arrocha, Jonatha; González-Valoys, Ana

Estabilización de Suelos Expansivos en Panamá con Mezclas de Residuos de Concha de Mar

Stabilization of Expansive Soils in Panama with Seashell Residue Mixtures

53

Portilla, Miguel; Ludeña, Raúl; Asanza, Víctor; Dávila, Miguel; Nevarez, Manuel

Diseño e Implementación de un Prototipo Portable de Generación Piezoeléctrica

Design and Implementation of a Portable Piezoelectric Power Generation Prototype

65

Valles, José M.; González-Longatt, Francisco; Riquelme-Rodríguez, José Miguel, Angeles-Camacho, César

Optimización Simultanea de los Parámetros de Esquemas de Desconexión Automática de Carga y Convertidores Grid-forming

Simultaneous Optimization of the Parameters of Under-Frequency Load Shedding Schemes and Grid-forming Converters

77

Monje Yovera, Paul Mauricio; Muñoz Perez, Socrates Pedro; Villena Zapata, Luigi Italo;
García Chumacero, Juan Martín; Diaz Ortiz, Edwin Adolfo; Quispe Osorio, José Luis

Effect of Total Replacement of Quarry Aggregate by River Aggregate on the Strength of Concrete

Efecto de la Sustitución Total del Agregado de Cantera por Agregado de Río en la Resistencia del Concreto

87

Quispe, Reynaldo; Juli, Verónica

Uso de Minimización Irrestricada de una Función Espectral para Estimar la Zona Visible en Matlab 19.0

Use of Unrestricted Minimization of a Spectral Function to Estimate the Visible Zone in Matlab 19.0

97

Carpio, Bryan; Muñiz, Abel

Efectos del Cartón y Cerámica Reciclada en las Propiedades del Concreto Hidráulico

Effects of cardboard and recycled ceramics on the properties of hydraulic concrete

Modelos Autorregresivos para Predecir la Velocidad del Viento en la Zona Rural Socabaya de Perú, 2022

Quispe, Reynaldo^{1*} ; Huamani, Renzon² 

¹Universidad Nacional José María Arguedas, Departamento Académico de Ciencias Básicas, Andahuaylas, Perú

²Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Departamento Académico de Física, Arequipa, Perú

Resumen: La zona rural del Perú presenta una gran variabilidad de vientos, su desconocimiento debido a la ausencia de modelos de predicción tiene un efecto desfavorable en la agricultura, infraestructura, seguridad, transporte y optimización de la energía eólica. Este trabajo obtiene un modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA) de predicción de la rapidez de viento en el lenguaje de programación R para la zona rural del Perú, distrito de Socabaya de Arequipa. La metodología consiste en el método cuantitativo y técnica documental, con una muestra de 334 datos de viento del año 2022 de la estación meteorológica Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) (POWER, 2023) para el distrito de Socabaya. Utilizando R, se aplicó el método paramétrico: Dicker-Fuller, Levene, D'Agostino, Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) y diferenciación ($d=1$) para lograr la normalidad y estacionariedad de los datos. Se analiza la función de autocorrelación simple (ACF) y función de autocorrelación parcial (Parcial ACF) mediante un proceso de ajuste recursivo, criterio de información de Akaike (AIC) para elegir el mejor modelo ARIMA de predicción. El resultado obtenido es el modelo de predicción de viento ARIMA (1, 1, 2), con una precisión de error de escala absoluta de media (MASE) de 0,849. Se concluye que el modelo ARIMA obtenido puede usarse para predecir la velocidad de viento en Socabaya a corto plazo, desde el 29 de noviembre hasta 8 de diciembre del 2022, y su aleatoriedad estaría influenciado por la variabilidad climática y cantidad de datos del año 2022.

Palabras clave: Simulación, modelos estocásticos, velocidad del viento, modelo ARIMA, predicciones de viento

Autoregressive Models for Forecasting Wind Speed in the Rural Area of Socabaya, Peru, 2022

Abstract: The rural area of Peru presents a great variability of winds, its ignorance due to the absence of prediction models has an unfavorable effect on agriculture, infrastructure, security, transportation and optimization of wind energy. This work obtains an autoregressive integrated moving average (ARIMA) model for the prediction of wind speed in the R programming language for the rural area of Peru, Socabaya district of Arequipa. The methodology consists of the quantitative method and documentary technique, with a sample of 334 wind data from the year 2022 from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) meteorological station (POWER, 2023) for the Socabaya district. Using R, the parametric methods Dickey-Fuller, Levene, D'Agostino, Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS), and differencing ($d=1$) were applied to achieve normality and stationarity of the data. The simple autocorrelation function (ACF) and partial autocorrelation function (Partial ACF) are analyzed by means of a recursive adjustment process, Akaike's Information Criterion (AIC) to choose the best ARIMA prediction model. The result obtained is the ARIMA (1, 1, 2) wind prediction model, with a mean absolute scale error (MASE) precision of 0.849. It is concluded that the ARIMA model obtained can be used to predict the wind speed in Socabaya in the short term, from November 29 to December 8, 2022, and its randomness would be influenced by climate variability and amount of data from the year 2022.

Keywords: Simulation, stochastic models, wind speed, ARIMA model, wind forecasts

1. INTRODUCCIÓN

La predicción meteorológica de viento como fuente de energía eólica ha desempeñado un papel importante en todo el mundo

durante décadas debido a su impacto en la vida humana desde la agricultura (Li et al., 2022), el control de tráfico aéreo (Dönmez et al., 2022), salud (Jastrzebska et al., 2022), desarrollo económico (Zahedi et al., 2022) y seguridad pública

*rrquispe@unajma.edu.pe
Recibido: 03/10/2023
Aceptado: 24/03/2024
Publicado en línea: 31/08/2024
10.33333/tp.vol54n1.01

CC 4.0

(Lesage et al., 2022). Los modelos ARIMA fueron planteados por Box y Jenkins en 1970 en su obra "Análisis de Series Temporales: Pronóstico y Control", la cual muestra que la predicción de viento depende de las características topográficas de la superficie terrestre, donde una serie temporal puede ser inferida a partir de un proceso de generación de datos (Uriel, 1985).

En algunos lugares de África como Tanzania, laderas de Kilimanjaro, centro de Sudán los fuertes vientos transportan la arena a los campos de cultivo secándolas y poniendo en peligro su producción agrícola (Stigter et al., 2002).

El viento es la energía renovable (ER) no contaminante más utilizada en la Unión Europea y constituye una fuente de energía eólica de bajo costo para almacenar energía en los parques eólicos marinos, sin embargo, es vulnerable al cambio climático global, lo cual afecta la vida silvestre y la supervivencia de las especies que dependen de su condición reproductiva personal (Ziemba et al., 2017). Las fluctuaciones de la velocidad del viento son uno de los principales obstáculos para su explotación en la red eléctrica. A una altura de 40 m, la velocidad media del viento en muchas regiones de Libia está entre 6 m/s y 7,5 m/s. A pesar de esto, hay varias épocas del año cuando soplan vientos cálidos y secos en cambio en la región oriental durante un año la velocidad promedio del viento fue 8,21 m/s (Badi et al., 2023).

A partir del siglo XIX, las investigaciones de predicción han aumentado, debido a la disponibilidad de datos meteorológicos online y propuestas de modelos de pronóstico ARIMA (p,d,q) con coeficientes p, d, q (Bórawski et al., 2020; Salman & Kanigoro, 2021).

Las mejoras en la previsión de energía eólica tienen potencial de incrementar la cantidad de reservas necesarias en sistemas con cantidades significativas de energía eólica, y finalmente reducir el costo de la electricidad en dichos sistemas mediante un análisis de series temporales con modelos ARIMA para pronosticar la futura producción de energía eólica con datos históricos (Hodge et al., 2011).

En China, los fuertes vientos produjeron descarrilamiento de ferrocarriles, por ello, se centró en predicción de alta precisión de velocidad de viento para sistemas de alerta de viento de los ferrocarriles. Con ese fin, se utilizó un modelo híbrido que combina la descomposición modal (EMD) y ARIMA mediante el modelo RARIMA (Hui et al., 2015).

Nuevas tecnologías para obtener energía eléctrica a partir de energías renovables llevaron a buscar metodologías que permitan identificar zonas con mejores condiciones de aprovechamiento de energía eólica mediante la utilización de modelos ARIMA aplicados a Tunja (Colombia), y se logró identificar 4 lugares óptimos para ubicar aerogeneradores (Benia et al., 2022; Gómez, 2016). Por ello, la ciencia ha avanzado en los estudios realizados con el fin de conocer las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad de viento, presión atmosférica, humedad, radiación solar, etc.) a través del uso de técnicas como ARIMA, así como el coeficiente U de Theil y el test de Diebold-Mariano (DM) con el que se

midieron cada una de las técnicas empleadas (Pilco & Acurio, 2019).

La velocidad de viento no solo se utiliza para el diseño e instalación de grandes parques eólicos, sino también para mantener segura la red eléctrica mediante la predicción de velocidad de viento utilizando un modelo estocástico ARIMA y un modelo basado en redes neuronales Feed-Forward Artificial Neural Network (FFANN) o perceptrón multicapa (MLP) (Dumitru & Gligor, 2019).

El uso de datos climáticos de temperatura, precipitación, humedad, horas de sol y velocidad de viento permitieron estimar las próximas 24 horas en un sistema de distribución de agua para riego, a través del uso de métodos ARIMA y redes neuronales (RNCs) (Pulido et al., 2002).

Las predicciones de velocidad de viento tienen profundo interés para el desarrollo de turbinas eólicas y las estrategias para construir grandes parques eólicos, pero estas predicciones se ven afectadas por la turbulencia atmosférica. Por eso, se utilizaron modelos estocásticos de series temporales ARIMA, con datos de 20 meses y una variable gaussiana para modelizar la variable meteorológica de viento (Sim et al., 2018).

La predicción de velocidad de viento a corto plazo, 6-8 horas, para un sistema eléctrico exige cada vez una mejor predicción en el Báltico. Los métodos de análisis de series de tiempo utilizaron modelos ARIMA y sus predicciones se validaron a través del error cuadrático medio de la raíz (RMSE), error porcentual absoluto medio (MAPE) y error absoluto medio (MAE) (Grigonytė & Butkevičiūtė, 2016).

En las islas de Baja California, se pronosticó la velocidad de viento mediante un modelo ARIMA y una red neuronal artificial (ANN), con errores obtenidos para pronosticar la tendencia no lineal que el modelo ARIMA no pudo identificar. Además, se utilizaron los errores estadísticos: MAE, error medio cuadrado (MSE) y RMSE (Cadenas & Rivera, 2010).

En Oaxaca y Metepec, se realizó una comparación de predicción de velocidad de viento entre el modelo ARIMA y modelos autorregresivos no lineales con entrada exógena (NARX), tomando una base de datos de presión, temperatura, viento y radiación solar. Se determinó la influencia de las variables meteorológicas sobre la velocidad del viento. Se concluyó que la red neuronal artificial fue 2,3% mejor que el modelo ARIMA, debido a su carácter no lineal (Cadenas et al., 2016).

Debido a la ausencia de modelos de pronóstico de velocidad de viento en Arequipa, se han producido daños en la agricultura, materiales y pérdidas humanas, por esta razón es necesario hacer un pronóstico mediante un modelo ARIMA. Con este fin, se cuenta con datos de velocidad de viento del Satélite ambiental operativo geoestacionario (GOES), con el propósito de beneficiar al sector de agricultura (aumento de cosechas), porque se encontrará una manera de anticipar las fuertes velocidades de viento. Así también promoverá la elaboración de más modelos estocásticos para futuras

investigaciones, no solo en vientos, sino también en precipitación, ozono, presión superficial, radiación solar, etc.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

La investigación fue realizada en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Nacional José María Arguedas (UNAJMA) en ambiente controlado. Para analizar los datos de velocidad de viento de escala longitudinal, se aplicó el método de investigación cuantitativo, mediante el lenguaje de programación R, luego se usó la técnica de recolección de datos y análisis documental para preparar una muestra de 332 datos de velocidad de viento desde el mes de enero hasta noviembre del 2022 del distrito de Socabaya de latitud $16^{\circ} 27' 9''$ Sur y longitud $71^{\circ} 31' 52''$ Oeste. La muestra fue obtenida de la página meteorológica de la NASA consultado en (POWER, 2023). Además, fue tomado en tiempo real por el satélite GOES, el cual está a 35 000 km sobre la Tierra girando en una órbita geoestacionaria para monitorear la población de datos de variables meteorológicas. La serie temporal fue constituida por dos variables una independiente y otra dependiente que son: los días y la velocidad de viento respectivamente.

Tener en cuenta que el tamaño de la muestra afectará la precisión y la confiabilidad de las predicciones realizadas por el modelo ARIMA. Es importante reconocer que, debido al tamaño reducido de la muestra, se cometerán errores estadísticos en las predicciones realizadas por el modelo ARIMA. Estos errores se deben a la falta de datos para capturar completamente la variabilidad y la complejidad del comportamiento del viento en la zona rural de Perú. A pesar de las limitaciones asociadas con el tamaño reducido de la muestra, se considera que el modelo ARIMA proporciona una herramienta valiosa para realizar predicciones preliminares de la velocidad del viento en la zona rural de Perú. Sin embargo, se reconoce la necesidad de recopilar datos adicionales a lo largo del tiempo para mejorar la robustez y la confiabilidad del modelo en futuros análisis.

En este estudio, se utilizan las velocidades de viento a 10 metros sobre la superficie terrestre, proporcionadas por NASA/POWER Nubes y el sistema de energía radiante de la Tierra (CERES) / Análisis retrospectivo de la era moderna para investigación y aplicaciones, versión 2 (MERRA2). Estas mediciones representan la velocidad del viento a una altura estándar y son relevantes para la evaluación de la velocidad del viento encima de la superficie. Los datos utilizados son datos diarios de resolución nativa, lo que significa que representan mediciones diarias de la velocidad del viento a lo largo del año 2022 en la zona rural del Perú, específicamente en el distrito de Socabaya de Arequipa. La elección de los datos diarios se basa en la disponibilidad de los datos proporcionados por NASA/POWER CERES/MERRA2. Además, los datos diarios permiten capturar la variabilidad diaria en las velocidades del viento, lo que es crucial para el objetivo de predecir la velocidad del viento a corto plazo en la zona rural.

2.2 Métodos

La Figura 1 muestra las fases que se aplicaron para determinar el mejor modelo predictivo.

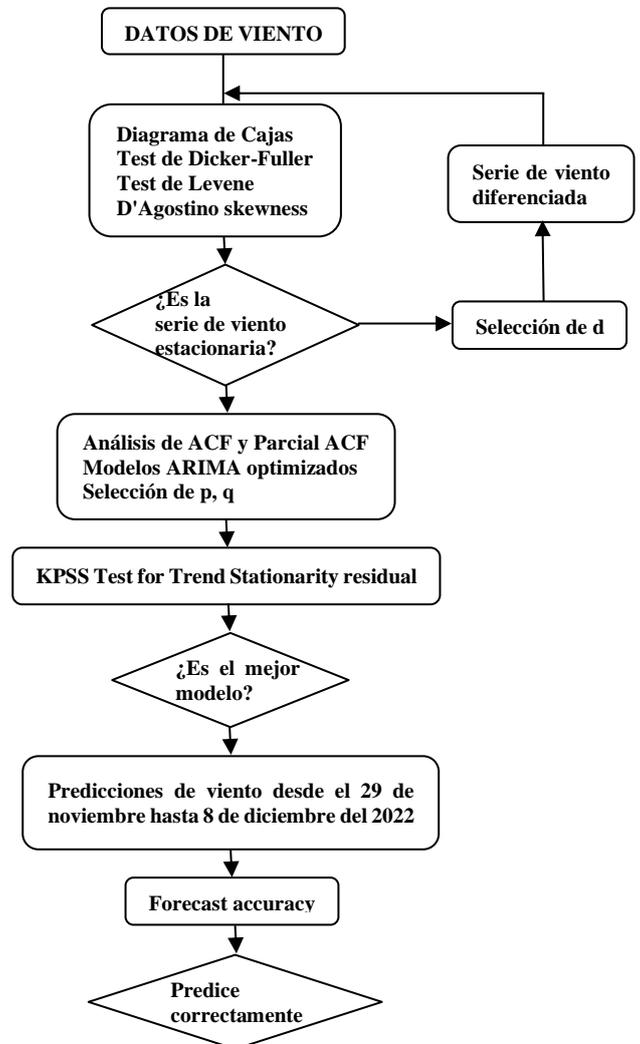


Figura 1. Fases del modelo ARIMA de la serie temporal de viento para el 2022

Las técnicas de análisis de datos aplicadas fueron los métodos paramétricos (Shewhart et al., 2019) en R: diagrama de cajas para la determinación de los valores atípicos, las pruebas de Dicker-Fuller, D'Agostino y Levene para verificación de la estacionariedad y normalidad de los datos antes y después de una diferenciación de orden 1. Además de KPSS Test para la estacionariedad, también se obtuvieron los valores del orden de la parte autorregresiva (p), orden de la parte de media móvil (q) y orden de diferenciación (d) de los modelos ARIMA, donde p representa el número de retrasos o periodos anteriores que se utilizan para predecir el siguiente valor en la serie temporal, q representa el número de términos de media móvil en el modelo, que se utilizan para capturar la estructura de los errores residuales de las predicciones y d indica el número de

veces que se diferencia la serie temporal para hacerla estacionaria (Benia et al., 2022).

También, se analizaron los ACF y Parcial ACF para generar los posibles modelos ARIMA, donde ACF es una medida estadística utilizada en el análisis de series temporales para evaluar la autocorrelación entre los valores de una serie temporal y sus valores retrasados en el tiempo. En nuestro estudio, la ACF se utilizó como una herramienta de diagnóstico para explorar la estructura de autocorrelación en los datos de velocidad del viento y guiar la selección de modelos ARIMA adecuados (Sim et al., 2018). Asimismo, mediante ACF e histograma de sus residuales y un proceso de ajuste recursivo AIC y criterio de información bayesiano (BIC) se eligió el mejor modelo. La precisión de la predicción del mejor modelo fue calculada a través de MASE, MAPE y MAE.

Debido al carácter no lineal de la variable meteorológica velocidad de viento, se recomienda utilizar redes neuronales autorregresivas: MLP, NARX, K-vecino más cercano (KNN) ó el método RARIMA, el cual es un modelo mejorado de ARIMA con un funcionamiento análogo al de una red neuronal.

Se recomienda tomar datos de velocidad de viento diaria con equipos del laboratorio de energías renovables de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) y hacer un contraste con los datos de NASA e implementar otra técnica de predicción para comparar la capacidad predictiva con la de los modelos ARIMA.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diagnóstico Exploratorio de Datos

En la Figura 2a, se observa que no hay presencia de valores atípicos para la muestra.

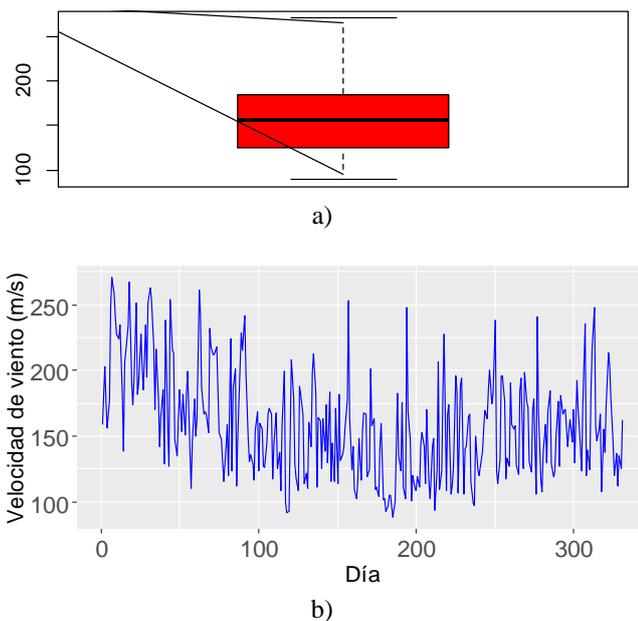


Figura 2. a) Diagrama de cajas b) Serie temporal de velocidad de viento del 2022 en R

La Figura 2b muestra la serie temporal de la velocidad de viento del año 2022 del distrito de Socabaya-Arequipa. Igualmente, se puede observar un comportamiento caótico debido a la aleatoriedad de la velocidad de viento, por lo que utilizando una simple inspección no se puede predecir el comportamiento de la serie temporal.

A partir de la Tabla 1 se observa:

- Para la Prueba de Dicker-Fuller, t-value -2,378 es menor en términos absolutos a todos los valores de tau, por lo tanto, existe raíz unitaria y la serie no es estacionaria.
- Para la Prueba de Levene, la significancia $Pr > 0,05$, por lo tanto, no hay estacionariedad en varianza.
- Para la Prueba de asimetría de D'Agostino, la significancia $p < 0,05$. Por lo tanto, la serie temporal no tiene una distribución normal.

Tabla 1. Identificación - Serie temporal de viento 2022 en R

Pruebas de estacionariedad y normalidad		
Prueba de Dicker-Fuller		
Estimate Std.	t-value	Pr(> t)
0,01424	-2,378	0,018
Valores críticos tau1 para estadísticas de prueba:		
1pct	5pct	10pct
-2,58	-1,95	-1,62
Prueba de asimetría de D'Agostino		
Skew	Z	p-value
0,56071	3,99088	6,583x10 ⁻⁵
Prueba de Levene		
F value		Pr(>F)
0,8485		0,5822

A partir de la Tabla 2 se observa:

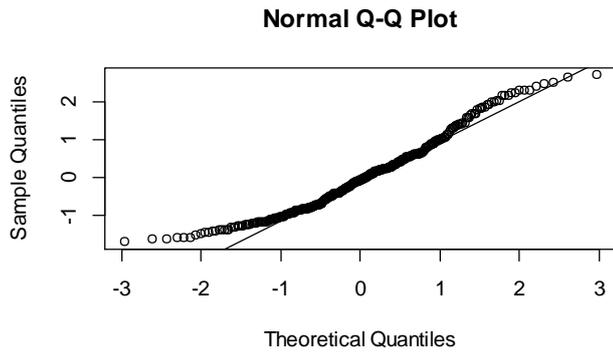
- Para la Prueba de Dicker-Fuller, t-value -25,18 es mayor en términos absolutos a los valores de tau, por lo tanto, no existe raíz unitaria y la serie es estacionaria.
- Para la Prueba de Levene, la significancia $Pr > 0,05$. En consecuencia, hay estacionariedad en varianza.
- Para la Prueba de asimetría de D'Agostino, la significancia $p > 0,05$. Por ende, la serie temporal diferenciada tiene una distribución normal.

Tabla 2. Identificación - Serie temporal de viento 2022 (d=1) en R

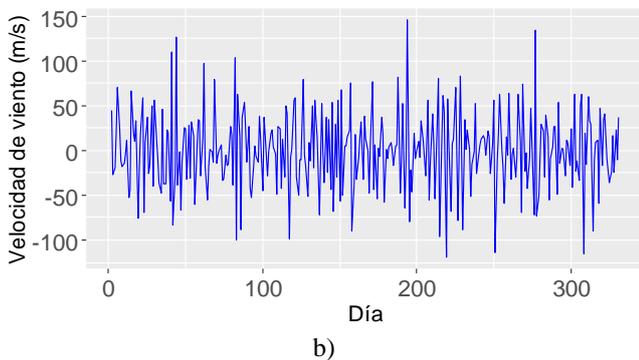
Pruebas de estacionariedad y normalidad		
Prueba de Dicker-Fuller		
Estimate Std.	t-value	Pr(> t)
0,05233	-25,18	2 x10 ⁻¹⁶
Valores críticos tau1 para estadísticas de prueba:		
1pct	5pct	10pct
-2,58	-1,95	-1,62
Prueba de asimetría de D'Agostino		
Skew	Z	p-value
0,084995	0,642863	0,5203
Prueba de Levene		
F value		Pr(>F)
0,9998		0,4433

Según la Figura 3a, se observa que no hay una tendencia a que los puntos de las distribuciones sigan una línea recta. Por lo tanto, la serie temporal no tiene un comportamiento normal.

Para lograr la estacionariedad en media y varianza en los datos de la serie temporal, se diferenci6 una vez (d=1), como se muestra en la Figura 3b.



a)



b)

Figura 3. a) Gráfico Q-Q normal, b) Serie temporal de velocidad de viento 2022 diferenciada (d=1) en R

3.2 Ajuste del modelo

A partir de la Figura 4:

- Para la representación gráfica ACF, se observa cuatro retardos significativos, pero solo se tomarán dos retardos debido a que sobresalen más de los límites de confianza obteniendo los modelos de medias móviles (MA), MA(q): MA (1), MA (2).
- Para la representación gráfica Parcial ACF, se observa más de tres retardos significativos, se tomarán los dos primeros retardos debido a que sobresalen más de los límites de confianza obteniendo los modelos autorregresivos (AR), AR (p): AR (1), AR (2). Para el criterio de elección de los retardos, se tomó en cuenta también los valores menores AIC, generados por la función auto.arima de R.
- Se obtiene el orden de las partes medias autorregresivas, integradas y móviles del modelo, ARIMA (p d q): (1, 1, 1), (2, 1, 1), (1, 1, 2) (2, 1, 2).

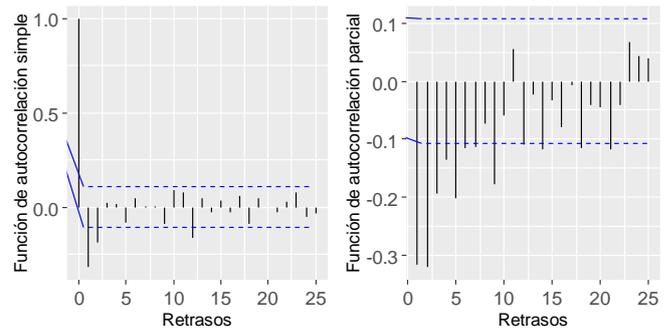


Figura 4. ACF y Parcial ACF para datos de viento diferenciados en R

En la Tabla 3 se presentan modelos ARIMA optimizados mediante un proceso de ajuste recursivo y prueba KPSS.

Tabla 3. Modelos ARIMA y Prueba KPSS en R- Serie temporal 2022 (d=1)

Modelo ARIMA	Coeficientes			
	AR1	AR2	MA1	MA2
(1, 1, 1)	0,267	-	-0,9396	-
s.e.	0,057	-	0,0176	-
σ^2 estimated as 1 203: log likelihood*=-1 639,58, AIC=3 287,2				
Est. Std.	0,057	-	0,01759	-
z value	4,666	-	-53,428	-
2,5 %	0,15489	-	-0,97405	-
97,5 %	0,37931	-	-0,90511	-
p-value = 1,081x10 ⁻⁶				
(2, 1, 1)	0,2797	-0,089	-0,9306	-
s.e.	0,0580	0,0575	0,0208	-
σ^2 estimated as 1 195: log likelihood = -1 638,4, AIC = 3 286,8				
Est. Std.	0,05803	0,0575	0,02083	-
z value	4,8199	-1,541	-44,6721	-
2,5 %	0,16597	-0,201	-0,97138	-
97,5 %	0,39344	0,0241	-0,88973	-
p-value = 0,8568				
(1, 1, 2)	-0,0283	-	-0,6206	-0,292
s.e.	0,1864	-	0,1769	0,1595
σ^2 estimated as 1 194: log likelihood = -1 638,33, AIC = 3 286,66				
Est. Std.	0,18635	-	0,17688	0,1595
z value	-0,1518	-	-3,5083	-1,832
2,5 %	-0,39353	-	-0,96725	-0,605
97,5 %	0,33696	-	-0,27387	0,0203
p-value = 0,8716				
(2, 1, 2)	0,0403	-0,025	-0,6892	-0,227
s.e.	0,4706	0,1472	0,4684	0,4412
σ^2 estimated as 1 194: log likelihood = -1 638,32, AIC = 3 288,63				
Est. Std.	0,47059	0,1472	0,46845	0,4412
z value	0,0856	-0,168	-1,4713	-0,514
2,5 %	-0,88208	-0,313	-1,60738	-1,092
97,5 %	0,96261	0,2639	0,22870	0,6378
p-value = 0,8726				
KPSS Trend		Truncation lag parameter		p-value
0,078452		5		0,1

* MLE (log likelihood)

A partir de la Tabla 3, se pueden observar los modelos con diferentes valores (p,d,q), con su error estimado estándar (Est. Std.), z value obtenidos, varianza de los residuos (σ^2), intervalo de confianza entre 2.5 % y 97.5 %, respecto a los coeficientes de los modelos. Se observa que los modelos (1, 1, 2) y (2, 1, 2) tienen valores MLE: -1 638,33, -1 638,32, respectivamente.

En la Tabla 3, también se observa que mediante la prueba Ljung-Box Q de la función Box.test se determina que los residuos del modelo (1,1,2) tienen el valor de $p=0.8716 > 0,05$, mostrando que los residuos no son dependientes y poseen el valor más pequeño del AIC = 3 286,66, además que su intervalo de confianza es el más alto entre 2,5 % y 97,5 %. A

partir de la Prueba KPSS el valor $p=0,1 >0,05$, entonces la serie de tiempo diferenciada es estacionaria en tendencia.

A continuación, analizaremos el comportamiento residual del modelo ARIMA (1, 1, 2).

A partir de la Figura 5, se puede identificar que los ACF de los residuos muestran autocorrelaciones no significativas (vea Figura 5b) y tienen un comportamiento normal respectivamente (ver Figura 5c), y según la gráfica de densidad espectral se verifica que no hay un patrón de residuales (ver Figura 5a), por lo tanto, se puede calcular el pronóstico.

Mejor modelo ARIMA				
Comando	Modelo ARIMA (1,1,2)	ar1	ma1	ma2
		-0,0265	-0,6315	-0,2912
auto.arima	s.e.	0,1894	0,1800	0,1643
	$\sigma^2 = 1227$: log likelihood = -1641,18			
	AIC=3 290,36 AICc*=3 290,48 BIC=3 305,56			
	Precisión del pronóstico en R			
	MAE	MAPE		MASE
	28,140	18,713		0,849

*AICc: Criterio de información de Akaike de segundo orden

3.4 Predicción mediante el uso de un modelo ARIMA

La Figura 6 representa el modelo predictivo ARIMA (1,1,2).

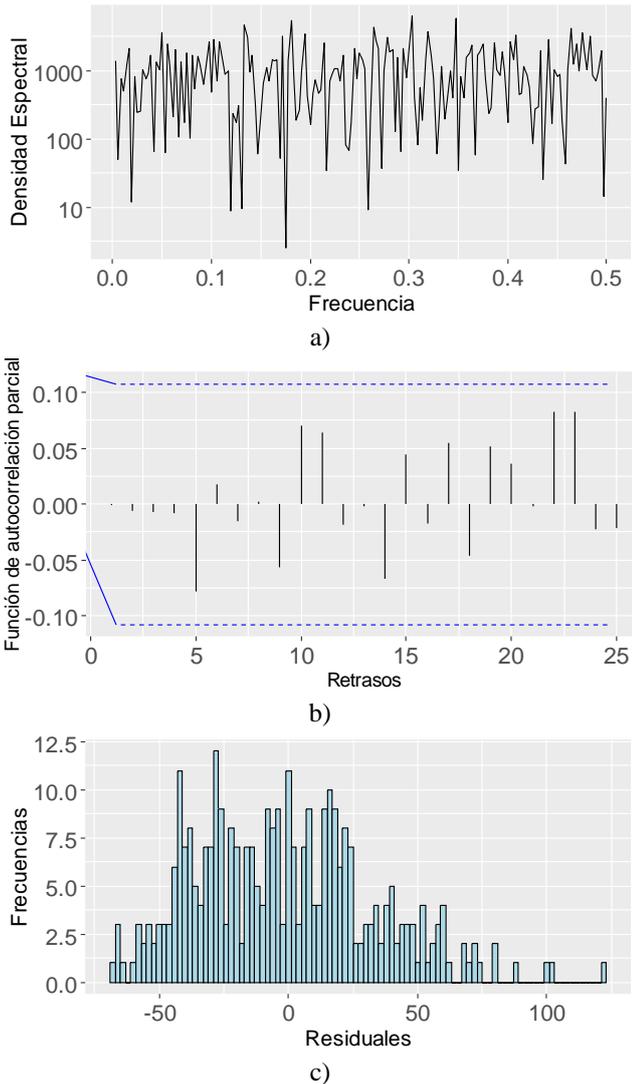


Figura 5. Gráfica de densidad espectral, ACF y Histograma en R para modelo ARIMA (1, 1, 2)

3.3 Elección del mejor modelo

La Tabla 4 muestra el mejor modelo obtenido mediante la minimización de la estimación de máxima verosimilitud, AIC, AICc or BIC. Se observa también un ajuste regular para la precisión de predicción logrando el menor error.

Tabla 4. Pronóstico y precisión en R

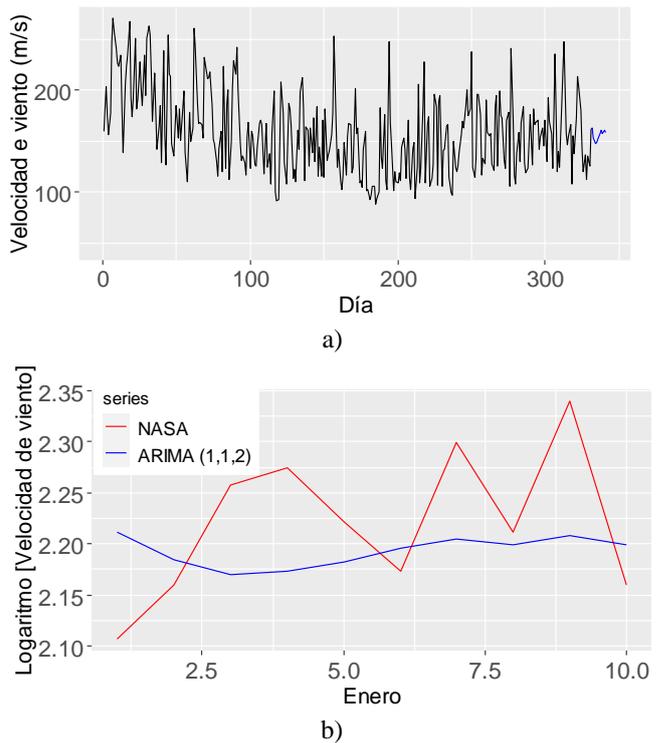


Figura 6. a) Predicción del modelo ARIMA (1, 1, 2), b) Comparación Log [Velocidad de viento] desde 29 de noviembre hasta 8 de diciembre del 2022 en R

La Figura 6a muestra los pronósticos de 10 valores de velocidad de viento futuros de las series temporales desde el 29 de noviembre hasta 8 de diciembre del 2022.

A partir de la Figura 6b, se observa una comparación de los datos de velocidad de viento entre serie temporal del mejor modelo ARIMA (1, 1, 2) y los de la NASA (POWER, 2023).

3.5 Discusión

Los datos de viento usados corresponden a varias épocas del año 2022 de la zona rural Socabaya de la región Sur Oeste de Arequipa, cuando soplan con velocidades promedio mayores a 150 m/s (ver Figura 2), a diferencia de las regiones orientales (Badi et al., 2023).

Los datos históricos de velocidades de viento (ver Figura 2) constituyen un potencial para pronosticar la energía eólica fundamental en el desarrollo de turbinas eólicas que podría

reducir el costo de la electricidad como los realizados por Hodge et al. (2011) y Pulido et al. (2002).

Debido a la disponibilidad de datos meteorológicos online (POWER, 2023), se pudo proponer el modelo ARIMA (1,1,2) para Socabaya. Esto contribuye al aumento de investigación de predicción como Bórawski et al. (2020) y Salman & Kanigoro (2021).

Los fuertes vientos de Socabaya produjeron accidentes de tránsito, desbordamiento de tierras en las chacras por ello el trabajo se centra en un modelo de predicción ARIMA de buena precisión MASE de 0.849, a diferencia de China que utilizaron un modelo RARIMA (Hui et al., 2015; Pilco & Acurio, 2019).

La predicción de velocidad de viento para Socabaya a corto plazo desde el 29 de noviembre hasta 8 de diciembre del 2022 a diferencia de la predicción, 6-8 horas en el Báltico hecha por Grigonytė & Butkevičiūtė (2016).

En la zona rural de Socabaya, se pronosticó la velocidad del viento mediante un modelo ARIMA (1,1,2) a diferencia de las islas de Baja California, en las cuales, el modelo ARIMA no pudo pronosticar recurriendo a una ANN (Cadenas & Rivera, 2010).

Una limitación del trabajo fue el tamaño de la muestra que delimitó la aplicación de los métodos paramétricos y determinación del mejor modelo ARIMA de la serie temporal.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados, se obtuvo el modelo de predicción óptima ARIMA (1, 1, 2) de la serie temporal de velocidad de viento 2022 en R para el Distrito de Socabaya-Arequipa, la cual cumple con las condiciones de estacionariedad en varianza, normalidad, invertibilidad, independencia de residuos y posee menor error.

El modelo ARIMA (1, 1, 2) es viable por su precisión MASE mayor al 0,8 entre datos de velocidad de viento de NASA y los datos pronosticados del modelo. Por lo tanto, el modelo sirve para predecir la velocidad del viento y evitar desastres en la agricultura, accidentes de transportabilidad, así como para mejorar la producción de productos agrícolas, salud, desarrollo económico y seguridad pública del distrito y será preponderante para estudios del cambio climático.

Los procedimientos utilizados en la metodología pueden ser útiles para determinar modelos de predicción de vientos en zonas con altos niveles de velocidades de viento.

No se consideraron los modelos ARIMA (1, 1, 1), (2, 1, 1), (2, 1, 2) para la predicción de velocidad de viento porque sus residuos eran correlacionados, y no se logró obtener el valor más pequeño AIC, además que su intervalo de confianza no es muy alto.

Se ha logrado obtener un modelo de predicción de velocidad de viento que podría estar influenciado por la variabilidad climática (presión, temperatura, radiación solar, etc.)

REFERENCIAS

- Badi, I., Pamučar, D., Stević, Ž., & Muhammad, L. J. (2023). Wind farm site selection using BWM-AHP-MARCOS method: A case study of Libya. *Scientific African*, 19, e01511. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2022.E01511>
- Benia, T. K., Goswami, S., & Banerjee, A. (2022). Application of SPSS for Forecasting of Renewable Energy as Future Energy in India. In *Advanced Machine Intelligence and Signal Processing* (pp. 379-391). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0840-8_28
- Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., & Dunn, J. W. (2020). Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*, 161, 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.081>
- Cadenas, E., & Rivera, W. (2010). Wind speed forecasting in three different regions of Mexico, using a hybrid ARIMA-ANN model. *Renewable Energy*, 35(12), 2732-2738. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.04.022>
- Cadenas, E., Rivera, W., Campos-Amezcuca, R., & Heard, C. (2016). Wind speed prediction using a univariate ARIMA model and a multivariate NARX model. *Energies*, 9(2), 109. <https://doi.org/10.3390/en9020109>
- Dönmez, K., Çetek, C., & Kaya, O. (2022). Air traffic management in parallel-point merge systems under wind uncertainties. *Journal of Air Transport Management*, 104, 102268. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102268>
- Dumitru, C. D., & Gligor, A. (2019). Wind energy forecasting: a comparative study between a stochastic model (ARIMA) and a model based on neural network (FFANN). *Procedia manufacturing*, 32, 410-417. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.234>
- Gómez Arévalo, G. A. (2016). Desarrollo de una metodología para obtener un atlas de viento de una microzona con datos disponibles de corto plazo en Tunja, Colombia. <https://hdl.handle.net/10901/9816>
- Grigonytė, E., & Butkevičiūtė, E. (2016). Short-term wind speed forecasting using ARIMA model. *Energetika*, 62(1-2), 2.3313. <https://doi.org/10.6001/energetika.v62i1-2.3313>
- Hodge, B.S., Zeiler, A., Brooks, D., Blau, G.E., Pekny, J.F., & Reklatis, G. (2011). Improved Wind Power Forecasting with ARIMA Models. *Computer-aided chemical engineering*, 29, 1789-1793. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54298-4.50136-7>
- Hui, L., Tian, H. Q., & Li, Y. F. (2015). An EMD-recursive ARIMA method to predict wind speed. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 141, 27e38. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.02.004>
- Jastrzebska, A., Hernández, A. M., Nápoles, G., Salgueiro, Y., & Vanhoof, K. (2022). Measuring wind turbine health using fuzzy-concept-based drifting models. *Renewable Energy*, 190, 730-740. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.116>
- Shewhart, W. A., Wilks, S. S., Balding, D. J., Cressie, N. A. C., Fitzmaurice, G. M., Givens, G. H., Goldstein, H.,

- Molenberghs, G., Scott, D. W., Smith, A. F. M., Tsay, R. S., Hunter, E. J. S., Johnstone, I. M., Kadane, J. B., & Teugels, J. L. (2019). *WILEY SERIES IN PROBABILITY AND STATISTICS*. <http://www.wiley.com/go/permissions>
- Li, X., Cao, Y., Yu, X., Xu, Y., Yang, Y., Liu, S., ... & Wang, Z. L. (2022). Breeze-driven triboelectric nanogenerator for wind energy harvesting and application in smart agriculture. *Applied Energy*, 306, 117977. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117977>
- Pilco Sánchez, V. K., & Acurio Martínez, W. D. (2019). *Técnicas estadísticas para la modelación y predicción de la temperatura y velocidad de viento en la provincia de Chimborazo* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/10955>
- POWER Data Access Viewer. (2023). Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (consultado el 20 de diciembre de 2022)
- Pulido Calvo, I., Roldán Cañas, J., López Luque, R., & Gutiérrez Estrada, J. C. (2002). Técnicas de predicción a corto plazo de la demanda de agua. Aplicación al uso agrícola. *Ingeniería del agua*, 9(3), 319-331. <https://doi.org/10.4995/ia.2002.2622>
- Salman, A. G., & Kanigoro, B. (2021). Visibility forecasting using autoregressive integrated moving average (ARIMA) models. *Procedia Computer Science*, 179, 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.004>
- Sim, S. K., Maass, P., & Lind, P. G. (2018). Wind speed modeling by nested ARIMA processes. *Energies*, 12(1), 69. <https://doi.org/10.3390/en12010069>
- Stigter, C. J., Mohammed, A. E., Nasr Al-Amin, N. K., Onyewotu, L. O. Z., Oteng'i, S. B. B., & Kainkwa, R. M. R. (2002). Agroforestry solutions to some African wind problems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(10), 1101-1114. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00224-6](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00224-6)
- Uriel, E. (1985). *Análisis de series temporales modelos Arima* (No. 517.2/U77a).
- Zahedi, R., Ghorbani, M., Daneshgar, S., Gitifar, S., & Qezelbigloo, S. (2022). Potential measurement of Iran's western regional wind energy using GIS. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129883>
- Ziamba, P., Wątróbski, J., Ziolo, M., & Karczmarczyk, A. (2017). Using the PROSA method in offshore wind farm location problems. *Energies*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/en10111755>

BIOGRAFÍAS



Reynaldo, Quispe, Licenciado en Física por la UNSA (2006), Magíster de la Escuela de Postgrado de Maestría en Educación mención: Investigación y Docencia en Educación Superior por la UANCV (2017), Maestro en Ciencias: con mención en Física por la UNSA (2022), realiza

estudios de Postgrado de Maestría en Ciencias, Física aplicada a la Medicina y Radioprotección en la UNSA (2022), docente seleccionado por PMESUT del programa de capacitación en investigación científica (2022), docente seleccionado para la presentación de POSTER de un trabajo de investigación en la UNAMAD (2022), Diplomado de Especialización en Docencia de Educación Superior (2021).



Renzon, Huamani, Egresado de la Escuela Profesional de Física de la UNSA (2022), realiza trabajos de investigación en el Área de Energías Renovables, seleccionado para la presentación de POSTER de un trabajo de investigación en la UNAMAD (2022).

Comportamiento Hidráulico del Flujo en el Modelo Numérico de un Disipador de Energía Tipo Vórtice

Gallegos, Álvaro^{1*} ; Ulquiango, Oscar¹ ; Lima, Paulina¹ 

¹Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Quito, Ecuador

Resumen: Para analizar y comprender el comportamiento del flujo en estructuras hidráulicas, se construyen modelos a escala, sin embargo, en el caso del disipador de energía tipo vórtice, la naturaleza helicoidal del flujo dificulta su análisis y la medición de datos, por lo tanto, se ha creado un modelo numérico a escala real que permitiera un análisis más eficiente del flujo en este tipo de disipador. Se aplicó la metodología de la dinámica de fluidos computacional mediante el software adecuado. Primero fue creada la geometría del disipador, luego el mallado, posteriormente se establecieron las condiciones de borde y parámetros físicos, con lo cual se resolvió el modelo obteniendo resultados que fueron validados con datos experimentales del modelo físico, para finalmente analizar el prototipo. Los resultados obtenidos no solo demostraron la aplicabilidad de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el diseño hidráulico y su calibración, sino que también proporcionaron una distribución espacial de las características hidráulicas a lo largo del prototipo, aspecto esencial en el diseño de este tipo de estructuras.

Palabras clave: Disipador, Energía, Vórtice, Hidráulica, ANSYS, Turbulencia, CFD

Hydraulic Flow Behavior in the Numerical Model of a Vortex Energy Sink

Abstract: In order to analyze and understand the flow behavior in hydraulic structures, scale models are built; however, in the case of the vortex-type energy dissipator, the helical nature of the flow makes its analysis and data measurement difficult; therefore, a full-scale numerical model was built to allow a more efficient analysis of the flow in this type of dissipator. The computational fluid dynamics methodology was applied using the appropriate software. First, the heatsink geometry was created, then the meshing, after the boundary conditions and physical parameters were established, with which the model was solved, obtaining results that were validated with experimental data of the physical model, to finally analyze the prototype. The results obtained not only demonstrated the applicability of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the hydraulic design and its calibration, but also provided a spatial distribution of the hydraulic characteristics along the prototype, an essential aspect in the design of this type of structures.

Keywords: Dissipater, Energy, Vortex, Hydraulics, ANSYS, Turbulence, CFD

1. INTRODUCCIÓN

Los pozos de caída de vórtice se utilizan habitualmente en los sistemas de alcantarillado urbano para transportar aguas pluviales o residuales a través de grandes desniveles. Un sistema de pozo de caída de vórtice consta básicamente de tres componentes: una estructura de entrada, un pozo vertical y una tubería de salida aguas abajo, que conecta al alcantarillado desde la salida del pozo. El agua baja en espiral por el tubo vertical en forma de remolino regular y la fuerza centrífuga garantiza que el flujo se adhiera a las paredes del pozo, evitando así la caída libre (Del Giudice et al., 2009).

En los últimos 10 años, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis de estructuras hidráulicas complejas, ya que permite simular de manera precisa y eficiente el desarrollo de los fluidos (Mrope et al., 2021). En este estudio se aplicó CFD para analizar el comportamiento hidráulico del flujo en un disipador de energía tipo vórtice en sistemas de alcantarillado, el cual es utilizado comúnmente en ingeniería para reducir la energía cinética de los flujos en canales abiertos en zonas de mucha pendiente, prevenir la erosión y el socavamiento de las estructuras aguas abajo (Usman et al., 2023).

La simulación numérica en este tipo de estructuras hidráulicas ha tenido mayor apertura en el continente asiático, donde las

*afgallegos1997@gmail.com
Recibido: 15/03/2024
Aceptado: 21/06/2024
Publicado en línea: 31/08/2024
10.33333/tp.vol54n1.02
CC 4.0

condiciones topográficas precisan construir disipadores de energía, es así como Chan et al. (2018) en Hong Kong abordaron la incapacidad de los modelos teóricos para explicar el flujo tridimensional (3D) en la entrada de un disipador hidráulico. Para ello, realizaron una simulación numérica en 3D utilizando el método de volumen de un fluido, y así validar sus predicciones con mediciones de velocidad mediante anemometría Doppler láser. Este estudio representa un avance significativo en la comprensión del flujo en 3D en disipadores hidráulicos.

Debido a la complejidad del flujo helicoidal que se produce en el disipador de energía, las mediciones experimentales en toda la estructura representan un desafío significativo, por ello, se utilizó la simulación numérica usando los resultados de un modelo físico a escala realizado por Chiluisa y Guanoluisa (2015), para calibrar y validar la parametrización del modelo numérico. Estos resultados permitieron posteriormente, predecir el comportamiento del prototipo, considerando que es 15 veces más grande que el modelo a escala.

Al existir más de un tipo de disipador tipo vórtice, resulta difícil estandarizar el comportamiento del flujo en la estructura, es así como, investigaciones previas han desarrollado simulaciones de disipadores tipo vórtice con una entrada tangencial a la cámara espiral. Yang et al. (2021) mencionan en su investigación que el núcleo de aire en el conducto vertical denota una clara asimetría. Por el contrario, el disipador tipo scroll estudiado en el presente documento adquiere un comportamiento diferente. Consecuentemente, se ha podido analizar el comportamiento del flujo helicoidal y la disipación de energía en función de la geometría del disipador.

Tomando en cuenta que en un modelo numérico se pueden simular diferentes estructuras hidráulicas y del material que se requiriese, es imperativo considerar valores de rugosidad acorde al material de la estructura. En esta investigación, se han desarrollado simulaciones con material acrílico para el modelo a escala, así como hormigón para el prototipo y tras realizar un análisis de sensibilidad se ha podido concluir que este parámetro puede obviarse tras una correcta configuración de datos iniciales y validar los resultados en función de datos experimentales, con el fin de optimizar el modelo y tiempos de simulación.

El análisis de los resultados obtenidos en la simulación numérica del prototipo permitirá una comprensión más profunda del comportamiento hidráulico del disipador de energía en un flujo estacionario y su aplicación en el diseño hidráulico. Esto debido a la versatilidad que ofrece CFD con la generación de diversos escenarios, por lo que este estudio servirá como una base para futuros diseños de disipadores de energía (Ogunsesan et al., 2021).

2. METODOLOGÍA

El diagrama de flujo de la Figura 1 describe el proceso del trabajo.

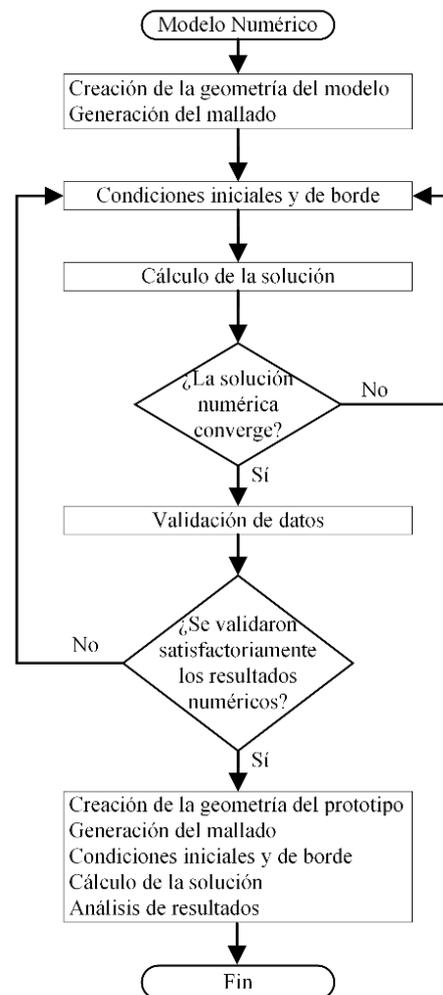


Figura 1. Diagrama de flujo. Metodología CFD

2.1. Creación de la geometría

La simulación numérica se ha llevado a cabo partiendo de la creación de la geometría del disipador tipo vórtice mediante Solidworks Student 2023 (SolidWorks, 2023), para esto ha sido necesario remitirse a los planos realizados por Chiluisa y Guanoluisa (2015).

2.2. Mallado de la geometría

La discretización del dominio computacional del disipador tipo vórtice se ha generado a través de un mallado mixto combinando elementos hexaédricos (malla estructurada) y tetraédricos (malla no estructurada) según se recomienda en Yang et al. (2021). Las zonas que poseen cambios de dirección y secciones variadas en donde la malla no estructurada se encuentra en la cámara espiral, conducto vertical y cámara de disipación. Además, se ha realizado el refinamiento cuatro veces más pequeño de la malla en las aristas y cambios de sección del disipador.

En relación con la discretización del dominio computacional, también se llevó a cabo un análisis de independencia mediante la realización de cinco escenarios con diferentes tamaños de celdas. El escenario que cumple con la calidad de mallado, parametrización de calidad de ANSYS CFX (Ansys, 2023) y

con la calibración de resultados tiene las siguientes características: tamaño de celda de 0.01m, un total de 307 766 nodos y 4h16minutos de simulación. En relación con los parámetros del mallado óptimo, se han obtenido los siguientes valores: 0.25 para la oblicuidad, 0.83 para la ortogonalidad, 2.03 para el aspecto del elemento y 0.94 para la calidad del elemento.

Se ha considerado la limitante de nodos que se pueden utilizar en el programa en su versión estudiantil (512 000 nodos). Además, las características del computador utilizado fueron: 16 GB de memoria RAM, SSD de 512 GB y un procesador Core i7 de 12ª generación.

2.3. Condiciones de borde

Una vez definida la malla óptima mostrada en la sección anterior, se procede a la parametrización de las características físicas del modelo, es decir, datos climáticos en las que fueron determinadas las características hidráulicas del modelo físico, las fronteras de ingreso y salida del flujo, paredes de la estructura, la frontera en contacto con la presión atmosférica.

El tipo de modelo de turbulencia escogido en primera instancia fue el RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), principalmente por razones de eficiencia temporal, ya que este modelo promedia las ecuaciones de Navier-Stokes en el tiempo o en el espacio eliminando fluctuaciones a pequeña escala. Generalmente, el modelo RANS permite realizar simulaciones más eficientes, en conjunto con modelos adicionales para capturar los efectos de la turbulencia. Por otro lado, el modelo DNS (Direct Numerical Simulation) realiza un proceso de resolución de las ecuaciones de Navier Stokes sin aproximaciones, lo que permite soluciones precisas a costa de una alta demanda computacional (Ruiz Solorio, 2014).

Entre los modelos RANS de turbulencia disponibles en ANSYS (Ansys, 2023), se escogieron dos, según criterios de simulación de estructuras similares propuestos por Yang et al. (2021) y Rodríguez (2016) que son: $k - \epsilon$ y RNG $k - \epsilon$. El primero de ellos idealiza dos parámetros: la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de energía turbulenta (ϵ), mientras el modelo RNG $k - \epsilon$ se basa en el modelo $k - \epsilon$, incorporando los efectos de escala de la turbulencia por lo que se utiliza para simular flujos en un rango más amplio de escalas.

Estos autores sugieren que el modelo RNG $k - \epsilon$ se acopla adecuadamente a un disipador tipo vórtice pues denota una mejor predicción del flujo de chorro en un análisis estacionario. Por otro lado, con el modelo $k - \epsilon$ se puede resolver gran cantidad de flujos turbulentos pues denota una gran solidez matemática y baja demanda computacional. Es por ello que el modelo $k - \epsilon$ ha sido utilizado mayormente para simular flujos industriales, así como modelos en los que intervenga transferencia de calor.

La simulación numérica se realizó con ambos modelos, adquiriendo un comportamiento muy similar y con resultados que confieren aceptabilidad en ambos casos. No obstante, para la presente investigación se eligió el modelo de turbulencia $k - \epsilon$,

que tardó 4h 16min de simulación, debido a su menor gasto computacional en comparación con el modelo RNG $k - \epsilon$, que tardó 5h 10min de simulación.

Los datos climáticos usados en el modelo han sido: presión de referencia de 0.71 atm, gravedad de 9.81 m/s^2 y temperatura del aire a 20°C . A pesar de que la simulación numérica podría realizarse para cualquier caudal, esta investigación se centra en la simulación de cinco caudales específicos, como lo indica la Tabla 1, utilizados con el propósito de realizar comparaciones con los resultados obtenidos del modelo físico y validar la simulación. Esta comparación se lleva a cabo en cuatro secciones, las cuales se muestran en la Figura 2.

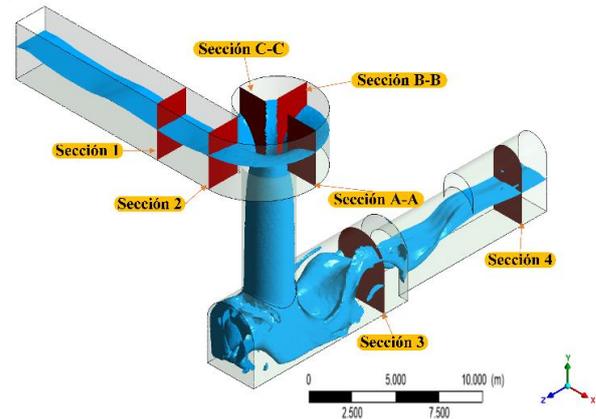


Figura 2. Secciones de medición

2.4. Solucionador

Una vez definidas las condiciones de borde del modelo numérico, se configuran las iteraciones máximas que el programa ejecutará y el valor mínimo de los residuales (RMS). Estos parámetros son establecidos para iniciar el proceso iterativo y obtener una solución aproximada de las ecuaciones de flujo.

La evaluación de los residuales en el modelo numérico indica si aquello está convergiendo hacia una solución precisa y estable, pues si los valores obtenidos son muy grandes denota que la solución no ha convergido y son necesarias más iteraciones para poder lograr una solución aceptable. Para el caso en estudio, se ha determinado un total de 2 000 iteraciones con un umbral de RMS de 1.0×10^{-4} , valor habitual a considerar en estructuras hidráulicas (Fernández, 2011).

En ciertos escenarios, como el abordado en esta investigación, las curvas residuales no alcanzan el umbral de RMS definido. Sin embargo, dichas curvas tienden hacia una misma solución en las últimas iteraciones del proceso, lo que indica que se ha obtenido convergencia en la solución, así como estabilidad en los resultados. Pues, según lo señalado por Fernández (2011), existen varios criterios para validar una simulación numérica, siendo la estabilidad, uno de los más relevantes en modelos influenciados por la turbulencia.

La solución del modelo numérico se validó correctamente al comparar los resultados computacionales con los datos del modelo experimental, como se evidencia en la Tabla 1. Los errores porcentuales, calculados como el valor absoluto de la

diferencia entre el resultado del modelo numérico y el valor experimental dividido por el valor experimental, son generalmente aceptables, siendo menores al 10% (Yang et al., 2021).

Los errores que exceden el margen establecido se encuentran en las secciones 1 y 2 de velocidades, para un caudal de 40.78 l/s. Este error refleja la incertidumbre inherente en la recopilación de datos físicos, pues para caudales anteriores, el error es inferior al 10%.

Es crucial destacar que en la sección 3-3, correspondiente a la cámara de dissipación, el comportamiento del flujo es variable,

por lo que existen errores porcentuales de más del 100%. Esta discrepancia se atribuye a la turbulencia en el dissipador, un fenómeno complejo que puede ser desafiante de modelar con precisión.

Con respecto a la sección 4-4, tanto para calados como velocidades, errores mayores al 10% son atribuibles a su proximidad a la cámara de dissipación. En esta zona, se produce un flujo mixto de agua y aire, fenómeno que el software puede tener dificultades para simular con precisión, resultando en estas variaciones. A pesar de estas anomalías, los resultados presentados en la Tabla 1 proporcionan una base sólida para avanzar con la simulación y el análisis del prototipo.

Tabla 1. Variables hidráulicas del modelo numérico

Parámetro	Caudal (l/s)				
	5.66	13.76	16.54	29.22	40.78
Flujo másico. Ingreso (kg/s)	5.65	13.74	16.51	29.17	40.71
Flujo másico. Salida (kg/s)	6.33	15.47	17.11	29.85	39.85
Iteraciones	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Tiempo de simulación	4h 46min	4h 22min	4h 31min	4h 16min	5h 3min
	Error (%)				
Velocidad máxima. Sección 1-1 (m/s)	0.00	2.82	6.85	8.54	33.33
Velocidad máxima. Sección 2-2 (m/s)	1.85	4.23	8.22	7.41	33.82
Velocidad máxima. Sección 3-3 (m/s)	8.70	82.76	114.29	58.33	30.00
Velocidad máxima. Sección 4-4 (m/s)	12.82	1.69	14.52	1.43	2.60
Calado. Sección 1-1 (m)	2.91	0.89	2.32	7.94	7.09
Calado. Sección 2-2 (m)	5.37	1.77	3.97	3.81	0.97
Calado. Sección 3-3 (m)	3.24	22.73	24.11	0.13	11.39
Calado. Sección 4-4 (m)	17.90	12.39	3.56	10.68	4.58

Se trabajó con una densidad de 998.29 kg/m³, correspondiente a una temperatura de 20°C, condiciones que fueron consideradas por Chiluisa y Guanoluisa (2015) al momento de ensayar el modelo físico.

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Dado que la parametrización del modelo numérico ha sido validada previamente con los resultados del modelo físico, se dispone de la configuración adecuada para simular el dissipador de energía tipo vórtice en un escenario distinto. En este caso, se trataría de una geometría de mayor tamaño, equivalente al prototipo. Este enfoque permite la proyección de los resultados obtenidos en la simulación del modelo a escala a un sistema de tamaño real, proporcionando una herramienta valiosa para el diseño y optimización de dissipadores de energía tipo vórtice en aplicaciones prácticas.

Para la transposición de las condiciones iniciales de un modelo físico a un prototipo se hace uso de la teoría de la similitud, propuesta por Kline, que menciona: “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los sistemas deben exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones” (Sotelo, 1974).

Es por ello que esta simulación se la realizará con un caudal de 25.46 m³/s y 35.54 m³/s, que por similitud hidráulica está en correspondencia con el caudal de 29.22 l/s y 40.78 l/s, ya que la relación entre el caudal del modelo y prototipo está establecida con la siguiente fórmula:

$$Q_p = Q_m \cdot \lambda^5 \tag{1}$$

Siendo lambda (λ) la relación entre las dimensiones longitudinales del prototipo y el modelo físico.

Es importante destacar que los resultados obtenidos en este estudio están sujetos a cierto grado de incertidumbre, atribuible a diversas fuentes. En primer lugar, el método de Volumen de Fluido (VOF) implementado en el software ANSYS que presenta limitaciones en la simulación precisa del flujo bifásico agua-aire (Yang et al., 2021). Específicamente, puede surgir dificultades al resolver con exactitud las interfaces entre ambos fluidos, un desafío que se intensifica en flujos con alta turbulencia o en presencia de fenómenos complejos como la atomización.

Además, las condiciones ambientales pueden introducir incertidumbre adicional. Un conocimiento insuficiente de los efectos de estas condiciones sobre la medición, o una medición imperfecta de las mismas, puede generar variaciones en los resultados.

Por último, los datos de entrada iniciales, obtenidos a través de mediciones en el dissipador, están sujetos a un margen de error inherente. Estos errores pueden propagarse a través del modelo numérico y afectar la precisión de los resultados.

A pesar de estas fuentes de incertidumbre, es relevante señalar que no han impactado de manera significativa los resultados de este estudio, ya que la validación de los resultados ha demostrado ser óptima. Sin embargo, es crucial tener en cuenta estas fuentes de incertidumbre al interpretar los resultados y al aplicar el modelo computacional a prototipos a escala real.

3.1 Análisis de sensibilidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de la rugosidad en el modelo físico mediante la simulación de 10 escenarios. El objetivo fue determinar si la rugosidad es un parámetro relevante en la simulación del disipador tipo vórtice y, en caso de no serlo, considerar la posibilidad de prescindir de este parámetro en el prototipo. En la Figura 3, se aprecian los resultados de velocidades en el modelo, el cual se ha configurado con una rugosidad absoluta (ϵ) de 1.5×10^{-3} mm (material acrílico) y una configuración omitiendo este parámetro.

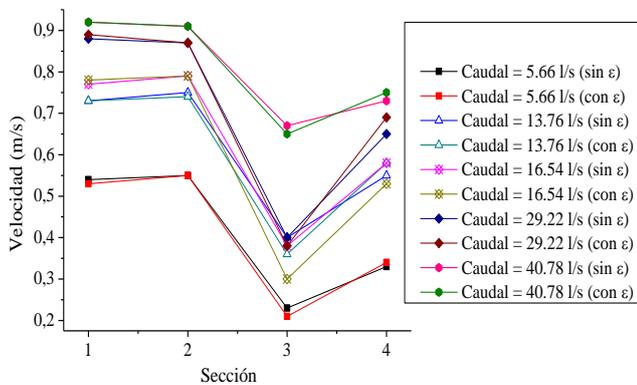


Figura 3. Velocidad del flujo en las secciones del modelo

Una vez obtenidas las curvas de velocidades, se observa que las diferencias de esta variable son despreciables, con una diferencia máxima de 0.04 m/s. Además, en correspondencia a los cambios de velocidad, los calados variaron 0.02 m. La sección 3 no fue considerada debido a su exposición a la turbulencia desarrollada en la cámara de disipación, lo cual genera datos menos representativos.

3.2 Cámara espiral

El objetivo de esta sección es guiar el flujo de agua en una trayectoria helicoidal, donde se produce un cambio de calado a lo largo de este recorrido, como se muestra en la Figura 4.

El calado tiende a incrementar en la sección A-A en consecuencia de la fuerza centrífuga generada por el cambio de dirección del flujo. Posterior a esta sección, los calados disminuyen conforme el flujo avanza hasta la entrada al tubo vertical. No obstante, es preciso mencionar que mientras el área mojada que circula en la cámara disminuye, las velocidades adquieren un comportamiento inversamente proporcional.

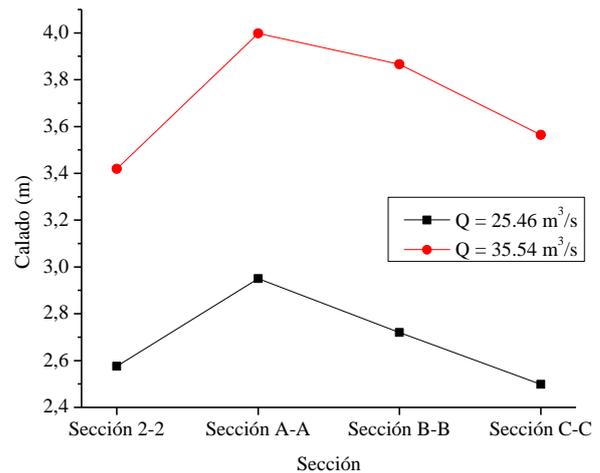


Figura 4. Calados en la cámara espiral

Este fenómeno guarda similitudes con el flujo en otros tipos de disipadores tipo vórtice, como los circulares, espirales o tangenciales, ya que, a pesar de diferir en su geometría, comparten la misma función: mantener estable el flujo y dirigirlo hacia la entrada del tubo vertical.

3.3 Tubo vertical

La zona del tubo vertical contempla una de las partes más importantes del disipador tipo vórtice, y puede ser analizada de manera más eficiente mediante una modelación numérica en comparación con un modelo a escala. Un aspecto importante del movimiento del flujo en esta zona es la presencia de dos componentes de la velocidad; una tangencial (perpendicularmente al eje del tubo vertical) y otra axial (paralela al eje del tubo vertical). En cuanto a la rugosidad del modelo, se la configuró de acuerdo con las propiedades del hormigón, considerando una rugosidad absoluta de 0.36mm. Sin embargo, este parámetro no ejerce una influencia significativa en el desarrollo del modelo como se lo explicó en el apartado de análisis de sensibilidad (Crispino et al., 2021).

La velocidad que se desarrolla a lo largo del tubo vertical adquiere un crecimiento debido a la acción de la gravedad. La Figura 5 indica las máximas velocidades en cada cota a lo largo del tubo. Así mismo, en esta gráfica solo se ha analizado la velocidad resultante, ya que es la velocidad primordial para el análisis correcto de la estructura hidráulica.

Otra característica importante que proporciona el modelo numérico es la visualización del ángulo de inclinación del flujo, lo cual provee información muy significativa que ayuda a evaluar si la longitud del tubo vertical es adecuada para lograr la formación del flujo helicoidal (Chan et al., 2019).

El ángulo de inclinación (θ) se forma con respecto al eje vertical y es de esperarse que conforme el flujo avanza, existirá una variación en el comportamiento del ángulo. En la Figura 6, se puede observar como este ángulo disminuye mientras se acerca a la cámara de disipación, esencialmente debido a la fricción con las paredes y al aumento de la componente axial de la velocidad.

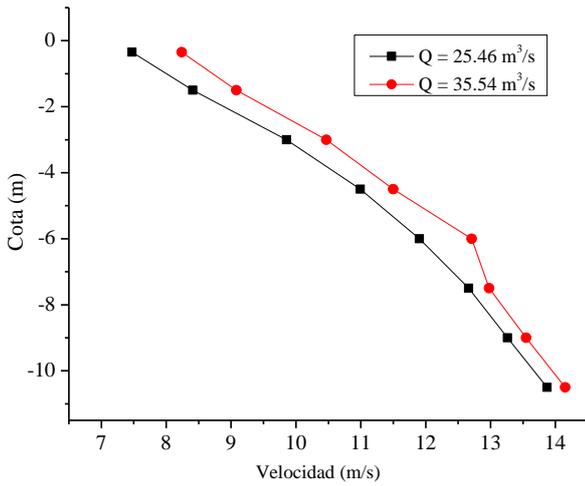


Figura 5. Velocidad en el tubo vertical

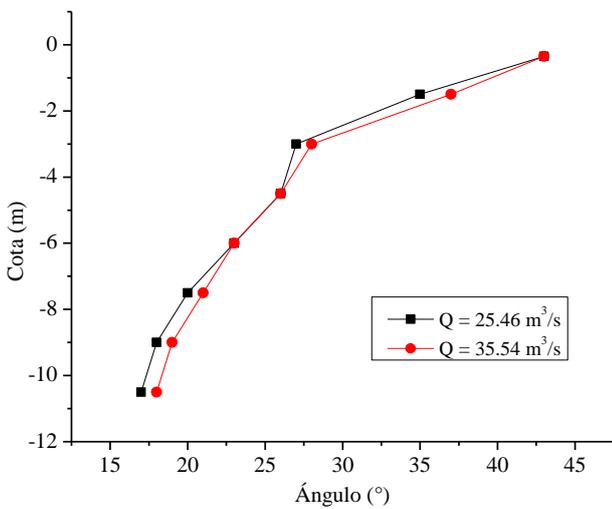


Figura 6. Ángulo de inclinación del flujo en el tubo vertical

Una observación acertada de este comportamiento es que el vector velocidad coincide con la dirección de las líneas de flujo, como es de esperarse, el cual se puede medir en ANSYS obteniéndose valores importantes para realizar cálculos analíticos.

Con respecto a la longitud máxima que el tubo vertical puede poseer, es importante mencionar el trabajo de Hager (1985), quien presentó una fórmula para estimar esta longitud, en la cual la velocidad tangencial disminuye su magnitud, dejando de tener un impacto significativo en la resultante de velocidad lo cual provoca que el flujo adquiera un comportamiento vertical. La expresión matemática que describe esta relación es la siguiente:

$$Z_d = \frac{3K^6}{g} \left(\frac{Q}{\pi \cdot D} \right)^{\frac{4}{5}} \quad (2)$$

Donde, K es el inverso del coeficiente de Manning, g es la gravedad, Q es el caudal y D es el diámetro del tubo vertical.

Aplicando la fórmula (1) se han obtenido longitudes máximas en función de los caudales simulados, con lo cual se ha modificado la geometría del tubo vertical y se consiguió visualizar el comportamiento de las líneas de flujo como se

aprecia en la Figura 7, lo que confirma la validez de la ecuación para este tipo de dissipador de energía y proporciona una referencia de diseño para esta estructura.

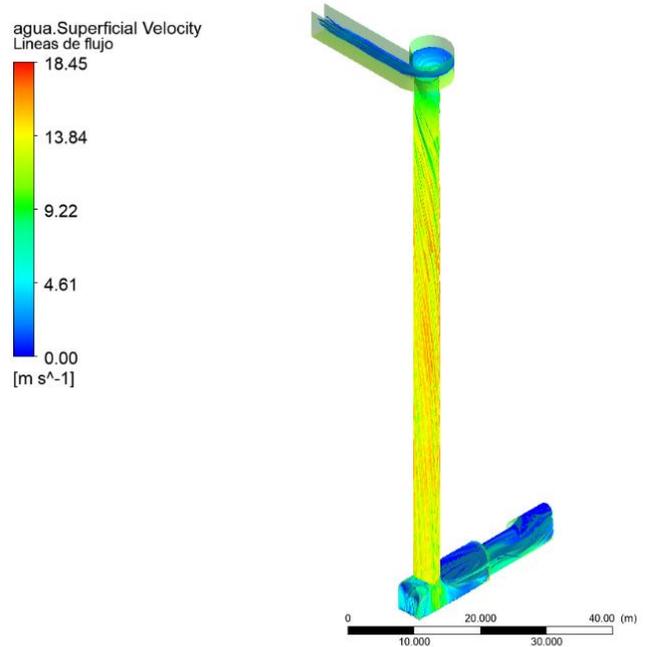


Figura 7. Longitud máxima del tubo vertical. Caudal: 25.46 m³/s

Una de las limitantes que presenta el dissipador tipo vórtice en su funcionamiento, es la velocidad máxima con la que puede fluir el agua en el tubo vertical, tal como se puede apreciar en la Figura 8. A medida que el tubo vertical se extiende, se observa que existe una velocidad límite que aumenta en función del caudal que se está desarrollando. Esta velocidad límite es atribuida a la presencia del núcleo de aire en el interior del tubo vertical, el cual genera resistencia al movimiento del flujo (Rodal et al., 2011).

Para el diseño del tubo vertical es necesario considerar una correcta aireación, así como su funcionalidad, para esto se ha hecho uso del valor lambda (λ), mismo que representa la relación entre el área del núcleo de aire y el área de la sección del tubo vertical. Considerando que se recomienda un valor por encima de 0.25, se ha examinado este número a través de la simulación numérica y se ha encontrado que la variación de lambda a lo largo del tubo vertical alcanza un valor mínimo de 0.41, esto garantiza el correcto funcionamiento del prototipo (Chan et al., 2018).

Finalmente, se observaron presiones negativas en la unión del tubo vertical con la cámara de dissipación. Para evaluar estas presiones es necesario recurrir al índice de cavitación el cual responde a la siguiente fórmula.

$$IC = \frac{P_{abs} - P_v}{0.5 \cdot v^2 \cdot \rho} \quad (3)$$

Donde, P_{abs} es la presión absoluta, P_v es la presión de vapor, v es la velocidad y ρ es la densidad del agua.

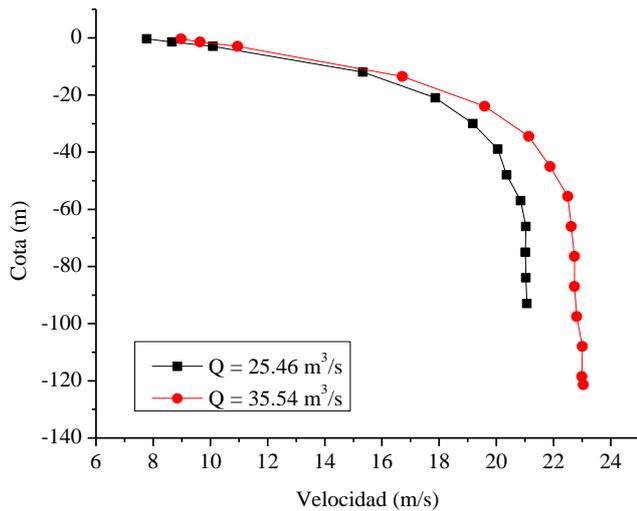


Figura 8. Variación de velocidad en el tubo vertical

Un valor superior a 0.2 indica una menor probabilidad de cavitación, como se evidencia para los caudales de $25.46\text{m}^3/\text{s}$ y $35.54\text{m}^3/\text{s}$, cuyos índices de cavitación son: 0.50 y 0.33 respectivamente. Estos valores se deben a las altas velocidades generadas en el extremo del tubo vertical, lo cual resulta en una disminución de la presión (Sentyabov et al., 2016).

3.4 Cámara de disipación

En la Figura 9, se observa el comportamiento del flujo cuando este ingresa a la cámara de disipación, las líneas de flujo adquieren un comportamiento impredecible, así mismo, la velocidad disminuye por presencia de un colchón de agua y como consecuencia se disipa la energía con la que el flujo ha ingresado a la estructura.

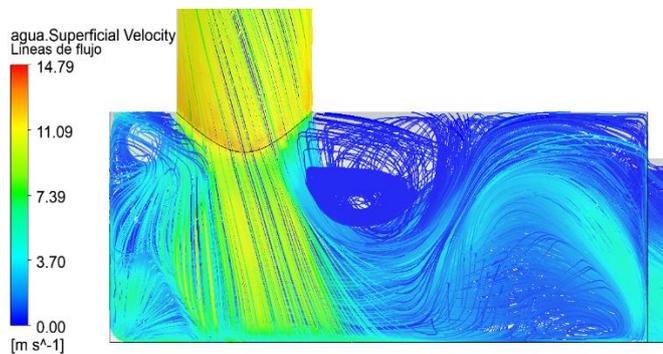


Figura 9. Líneas de flujo en la cámara de disipación

Esta sección de la estructura hidráulica presentó el mayor error promedio en comparación con los datos experimentales del modelo físico, donde se identificaron errores de más de 100 %. Esto se debe a la turbulencia generada en esta zona y la complejidad del cálculo con el modelo $k - \epsilon$, sin embargo, los resultados obtenidos para las demás partes del disipador cumplen con un error aceptable, menor al 10 %, como lo indica la Tabla 1.

El umbral de error del 10% proporciona un equilibrio razonable entre la precisión y la practicidad. En el contexto de la dinámica de fluidos computacional y los modelos

hidráulicos, permite una tolerancia en los resultados que no compromete la integridad del modelo.

Además, en el diseño de estructuras hidráulicas, una variación del 10% en los resultados numéricos no suele tener un impacto significativo en las decisiones de diseño ni en el rendimiento final de la estructura. Esto se debe a que los ingenieros a menudo diseñan con un margen de seguridad para acomodar tales variaciones.

Siguiendo con el análisis, las zonas de máxima presión se encuentran en la base de la cámara de disipación, principalmente causadas por el contacto directo del flujo con la solera de la cámara. Aunque esta presión se ve reducida por la presencia del colchón de agua y la generación de turbulencia, esta zona aún estaría expuesta directamente a los efectos de erosión, por lo tanto, deberían evaluarse métodos constructivos para proteger la estructura. Para los caudales simulados de $25.46\text{m}^3/\text{s}$ y $35.54\text{m}^3/\text{s}$ se obtuvieron presiones máximas de 78 614 Pa y 92 984 Pa, respectivamente.

Para concluir la discusión de resultados, se destaca que, a pesar de las diferencias en las geometrías de los estudios, se observó que las tendencias de las velocidades y calados en el presente estudio muestran una similitud con los resultados de investigaciones previas. En particular, se encontró similitudes con los artículos realizados por Zhang et al. (2018), Yang et al. (2021), Zhao et al. (2006) y Rodríguez (2016). Esta consistencia refuerza la validez de los hallazgos y proporciona una base sólida para futuras investigaciones en este campo.

3.5 Limitaciones

Las limitaciones más significativas en la simulación numérica del disipador de energía fueron la discretización y los modelos de turbulencia. Estos factores pueden consumir una cantidad considerable de recursos informáticos durante la ejecución de la simulación si no se definen adecuadamente y el tiempo de simulación puede extenderse a valores que no son prácticos.

La discretización inadecuada puede conducir a errores numéricos que representen de manera imprecisa los fenómenos físicos. Por lo tanto, en este estudio, fue esencial seleccionar cuidadosamente los parámetros de la simulación, donde la limitante del software de 512 000 nodos obligó a trabajar con un número de nodos menor. A pesar de esta limitación, los nodos fueron capaces de captar adecuadamente el comportamiento de los fluidos, lo cual resultó ser satisfactorio.

La falta de una adecuada validación de resultados habría impedido obtener un modelo preciso, puesto que el refinamiento de la malla no se hubiera podido establecer en ANSYS. En tal caso, se puede optar por usar un software libre de simulación, como OpenFoam, donde se permite un mayor refinamiento de la malla y, por lo tanto, una representación más precisa del flujo de fluidos, sobre todo en zonas donde la turbulencia es notoria.

Con respecto a la turbulencia, el modelo $k - \epsilon$ provee una estimación general del comportamiento del flujo dentro de la cámara de disipación y es importante reconocer sus

limitaciones. En particular, los modelos RANS proporcionan una descripción promediada en el tiempo del flujo turbulento, pudiéndose no capturar adecuadamente los detalles finos de la turbulencia, como se observó en la cámara de disipación, con errores mayores al 10%.

Para obtener un análisis más detallado y específico del flujo dentro de la cámara, sería beneficioso utilizar un modelo LES (Large eddy simulation), el cual se centra en resolver las estructuras turbulentas más grandes en el flujo, mientras que los efectos de las estructuras más pequeñas se modelan (Capote et al., 2008). Sin embargo, estos modelos requieren una resolución de malla mucho más fina y, por lo tanto, consumen significativamente más recursos computacionales. Aunque el tiempo de simulación con LES puede ser de semanas, este enfoque no se descarta si se dispone de suficientes recursos y tiempo. De hecho, el uso de LES puede ser muy beneficioso para obtener una comprensión más profunda de los fenómenos de flujo complejos.

Es importante tener en cuenta estas consideraciones al seleccionar el modelo de turbulencia más apropiado para una determinada simulación.

4. CONCLUSIONES

El modelo de turbulencia $k-\epsilon$ logró una mejor simulación del comportamiento del flujo en el dissipador de energía. Los datos experimentales concordaron de manera adecuada con los resultados del modelo numérico. Además, este modelo de turbulencia demostró ser más eficiente en términos de tiempo de resolución en comparación con el modelo RNG $k-\epsilon$. Estos hallazgos respaldan la posibilidad de emplear el modelo $k-\epsilon$ en futuros proyectos que involucren flujos con naturaleza helicoidal, así amplían las posibilidades de aplicación en diversos escenarios.

El análisis de sensibilidad realizado en este estudio reveló que la rugosidad de las paredes del dissipador de energía tiene un impacto mínimo en los resultados de la simulación. Esta observación crucial sugiere que la exclusión de este parámetro podría simplificar significativamente el modelo. Tal simplificación no solo acelera el proceso de simulación, especialmente en proyectos de gran escala, sino que también reduce notablemente el tiempo requerido para obtener resultados confiables. Lo más importante es que esta optimización se logra sin sacrificar la precisión y la fiabilidad del modelo. Por lo tanto, la exclusión del parámetro de rugosidad podría ser una estrategia valiosa para mejorar la eficiencia de las simulaciones de dissipadores de energía tipo vórtice, lo que tiene implicaciones significativas para la modelación y el diseño en la ingeniería hidráulica.

En el proceso de validación del modelo numérico se pudo inferir que la sección 3 incluida en la cámara de disipación, fue la única zona donde no se logró una concordancia con los resultados experimentales, ya que su error excedió el 10 %. Esto trasladado al prototipo solo resalta que los valores en esta región pueden carecer de fiabilidad debido a su comportamiento impredecible. Pero en un enfoque más general, estas zonas continúan demostrando una disipación

energética adecuada, dado que la eficiencia de la disipación superó el 80 %.

Al aumentar la altura del tubo vertical, se pudo observar que las velocidades adquieren una tendencia a crecer con forme el flujo circula hacia la cámara de disipación. Sin embargo, esta velocidad llega a un límite donde permanece prácticamente constante debido a la interacción que existe entre el núcleo de aire y las paredes del dissipador.

Es crucial garantizar que la longitud del conducto vertical se encuentre dentro del intervalo de la altura máxima. Esto se debe a que longitudes superiores resultarían en la pérdida del comportamiento helicoidal, lo que generaría un movimiento en caída libre. Como consecuencia, se perdería la función original para la cual se diseñó la estructura.

REFERENCIAS

- Ansys. (2023). *ANSYS CFX [versión estudiantil para PC]* (2023 R1).
- Capote, J. A., Alvear, D., Abreu, O. V., Lázaro, M., & Espina, P. (2008). Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 24(3).
- Chan, S. N., Qiao, Q. S., & Lee, J. H. W. (2018). On the three-dimensional flow of a stable tangential vortex intake. *Journal of Hydro-Environment Research*, 21(2018), 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.07.001>
- Chan, S. N., Qiao, Q. S., & Lee, J. H. W. (2019). Flow Features of an Unstable Tangential Vortex Intake. *Green Energy and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99867-1_55
- Chiluisa C., & Guanoluisa C. (2015). *Verificación del diseño hidráulico de un dissipador de energía tipo vórtice mediante modelo físico construido en laboratorio*. Universidad Central del Ecuador.
- Crispino, G., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Gisonni, C. (2021). Energy Head Dissipation and Flow Pressures in Vortex Drop Shafts. *Water*, 13(2), 165. <https://doi.org/10.3390/w13020165>
- Del Giudice, G., Gisonni, C., & Rasulo, G. (2009). Vortex Drop Shaft for Supercritical Flow. In *Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering* (pp. 1515–1520). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0_262
- Fernández J. (2011). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos* (Editorial Reverté, Ed.; 1st ed.).
- Hager, W. H. (1985). Head-Discharge Relation for Vortex Shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1985\)111:6\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1985)111:6(1015))
- Mrope, H. A., Chande Jande, Y. A., & Kivevele, T. T. (2021). A Review on Computational Fluid Dynamics Applications in the Design and Optimization of Crossflow Hydro Turbines. *Journal of Renewable Energy*, 2021, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/5570848>

- Ogunsesan, O. A., Hossain, M., & Droubi, M. G. (2021). Computational fluid dynamics modelling of multiphase flows in double elbow geometries. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(6), 1835–1846. <https://doi.org/10.1177/09544089211021744>
- Rodal E., Echávez G., & Ruiz G. (2011). Estudio experimental en modelo hidráulico del pozo de alta caída. *Instituto Argentino de Recursos Hídricos*.
- Rodríguez F. (2016). *Modelación numérica del flujo en un descargador a vórtice aplicando mecánica de fluidos computacional (CFD)*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ruiz Solorio, G. (2014). MODELOS DE TURBULENCIA EN MECANICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. *XXII CONGRESO NACIONAL DE HIDRAULICA*.
- Sentyabov, A. V., Timoshevskiy, M. V., Pervunin, K. S., Gavrilov, A. A., Markovich, D. M., & Dekterev, A. A. (2016). Numerical and experimental investigation of cavitation flow around naca0015 hydrofoil. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 327(8).
- SolidWorks. (2023). *SolidWorks [versión estudiantil para PC]* (2023).
- Sotelo, G. (1974). *Hidráulica General* (Limusa, Ed.).
- Usman, M., Shahid, S., Ali, S., & Ullah, M. K. (2023). Numerical simulations of turbulent and flow characteristics of complex river reach in Pakistan. *Environmental Engineering Research*, 28(1). <https://doi.org/10.4491/eer.2021.369>
- Yang, Z., Yin, J., Lu, Y., Liu, Z., Yang, H., & Xu, G. (2021). Three-dimensional flow of a vortex drop shaft spillway with an elliptical tangential inlet. *Water (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/w13040504>
- Zhang, W., Wang, J., Zhou, C., Dong, Z., & Zhou, Z. (2018). Numerical simulation of hydraulic characteristics in a vortex drop shaft. *Water (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101393>
- Zhao, C.-H., Zhu, D. Z., Sun, S.-K., & Liu, Z.-P. (2006). Experimental Study of Flow in a Vortex Drop Shaft. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2006\)132:1\(61\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:1(61))



enriquecer sus conocimientos.

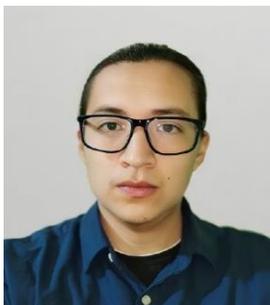
Oscar, Ulquiango, Ingeniero civil graduado de la Universidad Central del Ecuador, sobresale por su experiencia en presupuestos, ejecución de obras civiles y la aplicación de la CFD en proyectos hidráulicos. Apasionado por el crecimiento personal y profesional, busca constantemente aprender y



un Magíster de la Escuela Politécnica Nacional en 2007 y un Máster Complementario en Gestión de Riesgos Naturales en Bélgica en 2009. Destaca por su trabajo en estudios de ingeniería hidráulica desde 2004, con contribuciones significativas en desarrollo de proyectos hidráulicos relacionados con la Ingeniería Civil en el Ecuador.

Paulina, Lima, Profesora en el área de hidráulica de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Central del Ecuador desde 2014, ostenta un Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Nuevo México, Estados Unidos, obtenido en 2019. Tras graduarse en Ingeniería Civil en la UCE en 2004, Lima se especializó en Recursos Hídricos y Ciencias del Agua con

BIOGRAFÍAS



Álvaro, Gallegos, Ingeniero Civil de la Universidad Central del Ecuador, graduado cum laude por su Trabajo de Titulación. Experiencia en la realización de varios proyectos hidráulicos aplicando ANSYS. Sus intereses de investigación se enfocan en la dinámica de fluidos computacional y diseño de obras hidráulicas.

Closed-loop Speed Control for a Three-Phase Alternating-Current Motor using a Modbus Network

Rodríguez, Martín¹ ; Baes, Mario¹ ; Jara, Ricardo¹ ; López, Yadira² ; Orozco, Santos³ 

¹Universidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Rincón de Romos, México

²Universidad de Guadalajara, Departamento de Ciencias Exactas y Tecnología, Lagos de Moreno, México

³Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencia y Tecnología, Ciudad de México, México

Abstract: This paper presents a closed-loop controller for speed regulation of a three-phase induction motor by means of a Modbus network, which is compound only by industrial-purpose hardware, namely two programmable logic controllers, a human-machine interface and a variable-frequency drive. This represents a step beyond the state of the art because the results in similar works reported in the literature were obtained using personal computers, academic-purpose hardware or a combination of both academic-industrial technologies. The speed regulation was achieved through a proportional-integral controller executed in a programmable logic controller, whose feedback was supplied by another similar device completely dedicated to read and decode an industrial optical encoder; furthermore, the control signals were commanded to the alternating current motor using a variable-frequency drive. The proposed control network was tested through diverse regulation experiments, under different conditions, in order to assess its effectiveness and robustness. The obtained results were successful in terms of accuracy of the speed set-point tracking in comparison to the most similar works of the state of the art, namely zero steady-state error was achieved, 12 seconds earlier for 75% larger references and 22% less RMSE than other works, which are the best results reported so far. Such successful achievements encourage the later implementation of more advanced control techniques on three-phase-motor based industrial machinery using only industrial-purpose hardware.

Keywords: Three-phase motor control, PLC based control, Modbus networks, AC motor speed regulation

Control de Velocidad en Malla Cerrada para un Motor de Corriente Alterna Trifásico utilizando una Red Modbus

Resumen: Este artículo presenta un controlador en malla cerrada para regular la velocidad de un motor de inducción trifásico por medio de una red Modbus que únicamente utiliza hardware de propósito industrial, propiamente dos controladores lógicos programables, una interfaz humano-máquina y un variador de frecuencia. Esto representa una ventaja respecto al estado del arte, ya que los resultados de trabajos similares reportados en la literatura fueron obtenidos utilizando computadoras personales o hardware de propósito académico además del hardware industrial. La regulación de velocidad fue lograda a través de un controlador proporcional-integral ejecutado en un controlador lógico programable, cuya realimentación es suministrada por otro dispositivo similar que está completamente dedicado a la lectura de un codificador óptico industrial; asimismo, las señales de control se enviaron al motor de corriente alterna usando un variador de frecuencia. La red de control propuesta fue probada por medio de diversos experimentos de regulación, bajo diferentes condiciones, para evaluar su efectividad y robustez. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en términos de la precisión del seguimiento de la consigna de velocidad en comparación a los trabajos más parecidos del estado del arte, propiamente se eliminó el error en el estado estacionario 12 segundos antes para referencias 75% más grandes y un RMSE 22% menor que otros trabajos, los cuales son los mejores resultados reportados hasta el momento. Dichos logros motivan a la futura implementación de técnicas de control más avanzadas en máquinas accionadas por motores trifásicos utilizando únicamente hardware de propósito industrial.

Palabras claves: Control de motores trifásicos, Control basado en PLC, Redes Modbus, Regulación de velocidad de motores de CA

1. INTRODUCTION

Several machines that compound diverse manufacturing processes are actuated by three-phase alternating current (AC) induction motors because of its simplicity, robustness and cost, therefore, controlling its operation is a highly relevant task in industry (Du-

kare and Jagtap, 2017). Another relevant technology for industrial processes is the programmable logic controller (PLC), whose reliability, operation simplicity, electrical and mechanical robustness and high speed turn it into the preferred device in industry for the execution of automation and control algorithms (Dukare and Jagtap, 2017). Additionally, the possibility of developing PLC net-

*santos.orocho@uacm.edu.mx

Recibido: 23/11/2023

Aceptado: 11/03/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.03

CC BY 4.0

works that might include other industrial-purpose hardware, such as human-machine interfaces (HMI), increases the aforesaid preference of PLC and stand out their versatility. For such a reason, several manufacturing companies in Mexico are reluctant to the use of computers, embedded systems or laboratory-purpose hardware and software to automate or control their machinery, even though these devices might execute cutting-edge automation and control algorithms that could be beneficial to optimize or improve industrial processes.

Considering the aforementioned problem, an appropriate alternative for the industry could be the implementation of automation and control algorithms using just industrial-purpose hardware. In this context, and recalling the idea of the wide usage of three-phase AC motors, several researchers have reported PLC-based control systems for such electrical machines (Verma and Potdar, 2017) in the literature. One of the most remarkable results was presented by Saad and Arrofiq (2012), in which the authors programmed a fuzzy controller for an AC motor within the PLC, but they used a laboratory-type sensor, namely a DC motor adapted to work as a generator. Similarly, Howimanporn et al. (2016) reported an optimized PID controller for a conveyor belt actuated by an AC motor, nonetheless, the authors also used laboratory-purpose hardware to send the control signals to the motor. Some examples of the usage of laboratory-purpose software can be found in the works of Al-Manfi (2019) and Awdaa et al. (2020); in both cases the closed-loop control for the motor is implemented by means of high-cost software executed on a personal computer (PC) in addition to the PLC.

On the other hand, some works that only use industrial hardware have been reported as well, for instance, the speed control of a three-phase motor for a centrifugal machine of a sugar manufacturing process was reported by Pramudijanto et al. (2015). The authors implemented a predictive PID controller on a PLC, however, they do not specify the technology used for feedback, the execution of the control algorithm is not explained and their results are not clearly presented in plots, but only a 10.79 root median squared error (RMSE) is presented. In addition, Mahesh and Ramachandra (2017) presented a PLC-based P controller using just industrial-purpose hardware, obtaining successful results with an average of 2% steady-state error. Nevertheless, the authors do not show plots of the behavior of the speed and they do not present theoretical foundations. Another PLC based closed-loop controller without laboratory-purpose hardware is reported in the work of Demir et al. (2019), achieving a zero steady-state error in 40 seconds for their largest step reference from 0 to 1000 [RPM]. Despite these successful results, it is worth mentioning that the authors did not program the control algorithm but they only implemented and configured the proportional-integral-derivative (PID) controller functional block of the PLC programming environment. This represents a limitation if it is pretended to implement more advanced control techniques.

Besides, some researchers have tried to exploit the versatility of the PLC networks to control the speed of AC motors. For example, the use of open-platform communications (OPC) servers using Ethernet and other field buses to connect the PLC with variable-frequency drives (VFD) were presented by Velagic et al. (2011) and Al-Manfi (2019), in order to implement PID controllers. However, the use of a non-industrial-purpose PC within industrial

environments is still a drawback for such approaches since the robustness of the system might be compromised. Recently, a very interesting fully industrial setup for induction motors control was reported by Vadi et al. (2022), these authors use a PLC Profibus network to communicate the PLC with the VFD, but the closed-loop control action is still missing.

Considering the information found in the literature, the problem of implementing closed-loop control systems using just industrial-purpose hardware is not fully overcome. In this context, the contribution of this paper is twofold: in one hand, up to the best authors' knowledge, this is the first time that a PI controller is analyzed, clearly explained and fully programmed within a PLC using an industrial encoder as feedback. This represents a step towards the implementation of more complex control systems on industrial devices. On the other hand, the control system uses a Modbus network in order to communicate the feedback-analyzing PLC with the control PLC, the VFD and also an HMI that is useful to command the target speed and also to monitor the measured velocity. In order to assess the correct operation and the robustness of the full setup, the following experiments were put into effect: firstly, the controller was commanded with large target velocities to prove its stability in the whole error space; later on, the importance of the integral action is evaluated and highlighted through the disturbance rejection capability assessment. The successful results demonstrated that the proposed control architecture is suitable to effectively control three-phase AC motors by means of only industrial hardware, eliminating the necessity of high-cost additional software or laboratory-purpose hardware that is more likely to fail in industrial environments. Furthermore, the developed control algorithm yielded better results than those reported in the literature in terms of time of response and quantitative performance indices. Finally, the implementation of a Modbus network stands out the versatility of the industrial hardware and opens the possibility of involving more devices and adding functionalities depending on the application requirements.

The organization of this paper is as follows: firstly, the used methods are described in Section 2, namely the industrial hardware network is described in addition to the mathematical model of the plant as well as the control system design and its implementation. Then, the Section 3 addresses the experiments carried out and the obtained results are discussed and contrasted against the state of the art. Finally, the Section 4 concludes the paper.

2. METHODOLOGY

Below, the full system setup used for this research is described, as well as the development and implementation of the proposed control technique using the industrial hardware network.

2.1 System Description

The implemented experimental system is displayed in Figure 1. It is composed of two control and power panels, respectively, as well as an independent station dedicated for the speed data acquisition from the three-phase AC motor. The first panel is integrated by a Micrologix 1500 PLC (hereinafter PLC1) and a HMI Panel View Plus 600 touch screen. Furthermore, the 1761-NET-ENI and 1761-NET-AIC modules have been adapted to the PLC1 to communicate it with other devices through the Ethernet and RS485 com-

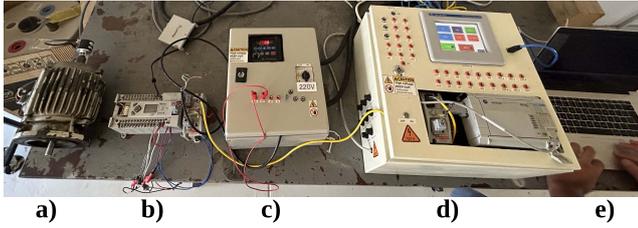


Figure 1. Experimental setup. a) AC motor. b) Speed-acquisition PLC. c) VFD. d) Panel with HMI and PLC. e) PC for PLC programming.

munication standards, respectively. The second panel contains a PowerFlex 40 VFD that feeds the AC motor with three-phase 220 [VAC]. Such a motor demands a 0.5 [HP] power, and its nominal speed is 1,800 [RPM], moreover, it is equipped with a 600-pulses-per-revolution quadrature encoder attached to the shaft.

Firstly, it was tried to implement the whole control system in the PLC1, however, the encoder counting and the control system algorithms execution interfered with each other affecting the correct control operation. Thus, it was decided to implement a Micrologix 1400 PLC (hereinafter PLC2), to which a 1761-NET-AIC module was also incorporated. This PLC was chosen since six of its digital inputs are capable to operate as high-speed counters (HSC), namely up to 100 [kHz], which turns this PLC into the most competitive model within the Micrologix PLC family in this regard, however, the same problem of interfering algorithms arose while executing the whole control system in the PLC2. In order to solve such a problem, it was decided to implement a dedicated station to capture and process the encoder signal for its later transmission and usage.

The reference data for the implemented speed control system, in [RPM], is entered by the user through a graphical interface embedded into the HMI screen. In the same interface, the speed data of the motor shaft is displayed also in [RPM] after having been conditioned by the Micrologix 1400 PLC (hereinafter PLC2). Likewise, the magnitude of the error and the control signal sent to the VFD, both in [Hz], are displayed in two other labels. Some buttons to perform the functions of start, stop and reverse rotation are included as well to manipulate the AC motor.

The communication between the devices in charge of both the acquisition of the feedback signal, as well as sending the control signal, is carried out through the Modbus protocol, supported by the 1761-NET-AIC module and by the VFD itself, through an RS485 input provided. Meanwhile, for the interaction between the HMI screen and the Micrologix 1500 PLC, the Ethernet IP protocol is used, associated with the 1761-NET-ENI module.

Based on its interaction with all the elements of the implemented control system, the corresponding control algorithm is executed in the PLC1. In this case, a discrete Proportional Integral (PI) controller. It is worth mentioning that the code developed, built on the IEC-61131-3 programming standard (ladder language), does not use any specialized function for the application of the mentioned PI controller, but the algorithm was completely developed from scratch using a numerical integration.

2.2 Plant Modelling

In order to obtain a transfer function that relates the three-phase motor speed with the VDF frequency, the well-known Ziegler-

Nichols reaction curve method was implemented.

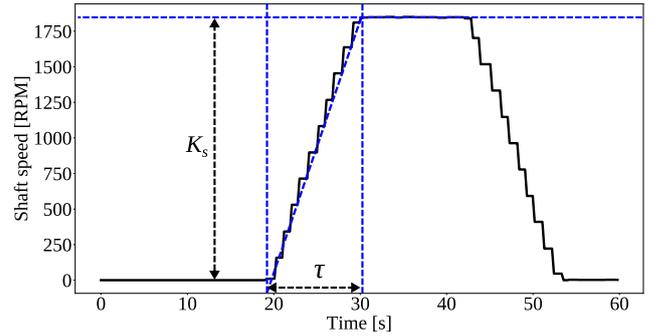


Figure 2. Reaction curve and Ziegler-Nichols parameters.

According to the parameters obtained from the Ziegler-Nichols reaction curve method, as shown in Figure 2, the transfer function representing the relation between the shaft speed of the three-phase AC motor with respect to the frequency input is given by

$$G(s) = \frac{K_s}{\tau s + 1} e^{-Ls}, \quad (1)$$

in this case, $K_s = 1,800$ and $\tau = 11$ and $L = 0$. It is worth mentioning that this modelling approach, besides its wide use in industry, is well supported in the literature for its use in electrical motors (Ustun and Demirtas, 2009; Bhatti et al., 2016; Avdeev and Vyngra, 2020; Nicola and Nicola, 2021).

In order to adequately synchronize the Modbus network, a sampling period of 250 [ms] was implemented. Thus, a discretization of the system (1) was put into effect based on the aforementioned period and the zero-order hold method and resulting in the discrete-time transfer function

$$G(z) = \frac{a}{z - b}, \quad (2)$$

with $a = 40.45$ and $b = 0.9775$ according to the discretization process. Now this transfer function is helpful to design a discrete-time closed-loop control system.

2.3 Control System Design

The control target in this work is to lead the shaft speed of the AC motor $\omega(k)$ to a desired value $\omega^d(k)$, with $k \geq 0$ denoting the sample number. In this context, a feedback controller is required to reduce to zero the error between the desired speed and the measured speed, namely, $e(k) = \omega^d(k) - \omega(k)$. Since (2) is a first-order system without delay, a Proportional-Integral (PI) controller is suitable to regulate the shaft speed (Landau and Zito, 2010), therefore, considering the error in the \mathcal{Z} domain, $E(z) = \Omega^d(z) - \Omega(z)$, the transfer function of the mentioned controller is (Moudgalya, 2007)

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K \left[1 + \frac{T_i z - 1}{T_s z} \right], \quad (3)$$

where $K > 0$ is the proportional gain to be defined, $T_i > 0$ is the integral time and T_s is the sampling period. Even though the control parameters can be determined using the Ziegler-Nichols approach, the system delay is zero and hence, such a methodology

is not applicable. Besides, the gain tuning procedure was conducted by analyzing the pole of the closed-loop transfer function with only the proportional controller, which is given by

$$\frac{\Omega(z)}{\Omega^d(z)} = \frac{Ka}{z + (Ka - b)}. \quad (4)$$

Considering the stability condition, $-1 < z < 1$ (Ogata, 2015), the proportional gain can be computed with

$$\frac{b-1}{a} < K < \frac{1+b}{a}. \quad (5)$$

Once the stability is ensured with the proportional controller, the integral action was added yielding the following closed-loop transfer function (Landau and Zito, 2010)

$$\frac{\Omega(z)}{\Omega^d(z)} = \frac{Ka \left[\frac{T_s}{T_i} z + 1 - \frac{T_s}{T_i} \right]}{z^2 + \left(K \frac{T_s}{T_i} a - b \right) z + Ka \left(1 - \frac{T_s}{T_i} \right)}, \quad (6)$$

where T_i is the integration time. In this work $K = 0.01$ was selected, which satisfies the stability criterion for the P controller. In addition, the integration time was determined considering a period of 25 [ms] to allow a correct pulse count from the encoder, therefore, the ratio T_s/T_i must be 0.025 and consequently, the integration time was computed as 20 [s]. Finally, the stability of the closed-loop system with PI controller (6) is guaranteed since both poles $z_{1,2} = 0.4728 \pm 0.7526j$ are inside the unit circle of the complex plane.

2.4 Controller Implementation

The controller (3) in terms of equations of differences can be expressed as (Bolton, 2021)

$$u(k) = Ke(k) + K \frac{T_i}{T_s} e(k) + u(k-1); \quad (7)$$

this last expression was programmed in the PLC1, using the ladder language within the RsLogix programming environment. In order to compute the control signal $u(k)$, the error was firstly computed by means of both the target speed $\omega^d(k)$ and the shaft speed $\omega(k)$. The first one can be directly commanded through the HMI touch

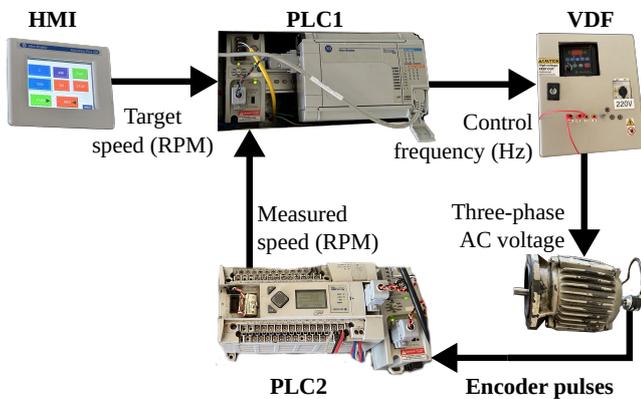


Figure 3. Block diagram of the control system network.

panel with a range from 0 to 1,800 [RPM] and later on is sent to the PLC1 using the Modbus network. The latter is obtained from the encoder attached to the shaft of the AC motor; the generated pulses are counted at a 20 [kHz] frequency with the PLC2 and later transferred to the PLC1 also through the Modbus network; the use of the PLC2 is justified since only this device was capable to accurately read the encoder pulses while spinning at the nominal shaft speed. Next, the PLC1 computes the control signal $u(k)$, as it was mentioned before, and transforms it into frequency units with a range from 0 to 600, which is also sent via the Modbus network to the VFD. Finally, such a signal is translated to the range from 0.0 to 60.0 [Hz] and then applied to the AC motor. The block diagram of the full control system is depicted in Figure 3, where all the signals and the devices processing them are illustrated. In addition, the flow diagram of the control system algorithm executed by the PLC1 is shown in Figure 4, where the interaction between the PLC and other devices can be observed meanwhile it executes the proposed control system.

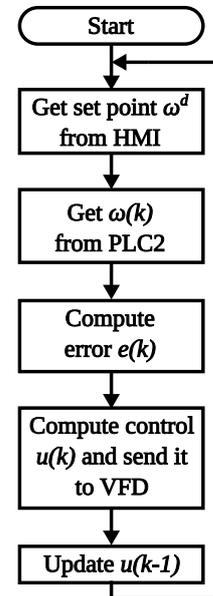


Figure 4. Block diagram of the control system algorithm.

3. EXPERIMENTS AND RESULTS DISCUSSION

In order to evaluate the correct operation and robustness of the proposed Modbus control network, some experiments were performed. The details of their conduction and the results are detailed below. A video of the experiments can be found at <https://youtu.be/zDgAH1HhDGA>.

3.1 PI Controller using Large Step References

Once the PI controller algorithm was programmed within the PLC, the first test to evaluate the performance of the implemented system consisted in widely changing the set-point speed. In this way, starting from a total inactivity state of the motor (0 [RPM]), the maximum admissible speed value was commanded, namely 1,800 [RPM]. After the motor speed converges to the commanded value, the set-point was shifted to 50 [RPM]. This process was repeated

by commanding diverse large steps as the assigned reference values, which are displayed in Table 1. Likewise, it is possible to appreciate the graphic behavior of such changes in Figure 5, and how the response is established in the assigned value for each case analyzed, nullifying in all cases the steady-state error and yielding an overshoot of less than 2%.

Table 1. Large Step References in [RPM]

Stages	Desired [RPM]
1	1,800
2	50
3	1,100
4	40
5	1,200
6	20

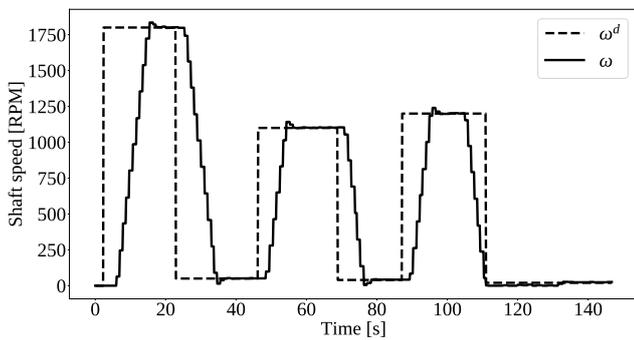


Figure 5. Time evolution of the controlled shaft speed with large set-point changes.

3.2 Disturbances Rejection Assessment

After validating the proper behavior of the PI controller while facing sudden changes in the speed reference value, some other experiments were carried out to visualize and compare the responses obtained using both the PI controller and a proportional (P) controller, after applying a disturbance torque to the AC motor shaft. The main target of this experiment is to evaluate whether the proposed controller would recover the set-point speed of the motor shaft, despite the presence of disturbances, such as the application of load on the shaft for instance.

For the case of the P controller, as shown in Figure 6, it can be seen how the speed drops from 120 [RPM] to almost zero after applying a disturbance. The controller is unable to set an output that can effectively cope with the effect of the load. On the contrary, it seems that the control signal is similar with or without the presence of disturbances as can be seen in Figure 7. Therefore, this control action alone is insufficient to keep the shaft speed at the desired value in presence of disturbances.

Regarding the action of the PI controller, in Figure 8 it can be seen how eventually, after the shaft speed drops due to the action of the imposed load, the controller computes and supplies a larger amount of energy leading to maintain the magnitude of the speed at the entered target value. Likewise, in Figure 9 it is observed how after having established a considerable energy to mitigate the load effect, the speed is again regulated to its given set point.

In order to provide a quantitative result to show which performance is better among both controllers (Balestrino et al., 2006), the Integral of the Absolute Error (IAE) and the Integral of the Absolute value multiplied by Time of the Error (ITAE) were computed as follows

$$IAE = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N |e(k) + e(k+1)|, \quad (8)$$

$$ITAE = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N k |e(k) + e(k+1)|, \quad (9)$$

where N is the number of samples of the experiment. The resulting values are listed in Table 2, where it can be observed that the PI controller significantly reduces both indices.

Table 2. Performance indices for the closed-loop controllers

Index	P	PI
IAE	10.9×10^3	7.5×10^3
ITAE	18.1×10^3	8.4×10^3

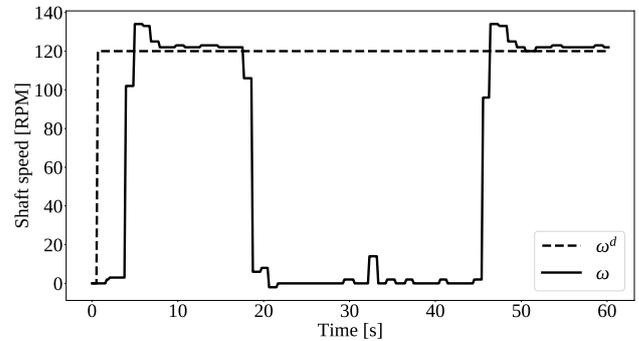


Figure 6. Time evolution of the controlled shaft speed with P control and application of disturbances

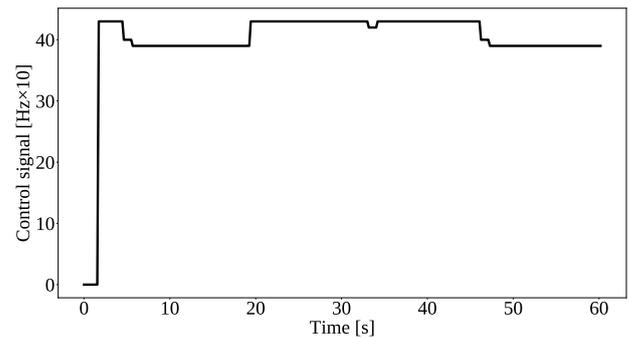


Figure 7. Time evolution of the P control signal with application of disturbances

3.3 Results Discussion

Figure 5 that the proposed PI controller (7) executed by the Modbus network devices is effective for speed-regulation despite how large the set points from each other are. No steady-state error and a 2% overshoot can be also appreciated which is acceptable for this industrial machine. The importance of including an integral action to improve the robustness of a control system is stood out

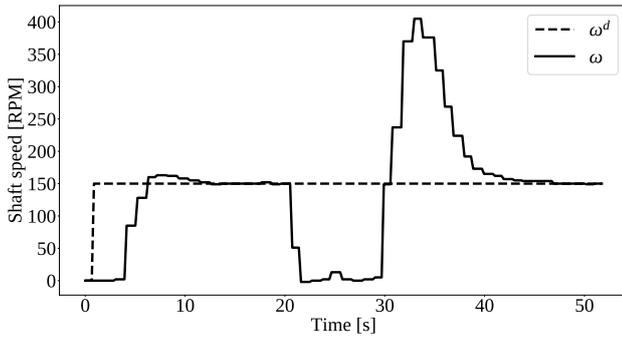


Figure 8. Time evolution of the controlled shaft speed with PI control and application of disturbances

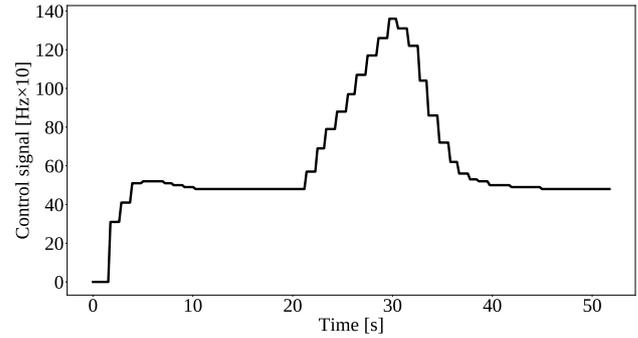


Figure 9. Time evolution of the PI control signal with application of disturbances

from the disturbance rejection assessment. Figure 8 shows how the speed is recovered after a disturbance using the PI controller (7) in contrast to Figure 6, where it can be observed that the shaft remained steady during the disturbance application when using the control P (4). Likewise, Figure 9 shows that the PI control signal increased while the disturbance was being applied, in contrast to the P control signal in Figure 7, where no significant change can be appreciated, resulting in insufficient energy to mitigate the disturbance action. The computed indices (8) and (9) shown in Table 2 are consistent with the graphical results, showing that the PI controller reduced the error caused by the applied disturbance.

Moreover, the obtained results in this work were contrasted against those obtained by Pramudijanto et al. (2015) and Demir et al. (2019), since these are the only similar works presenting their results. For the case of the predictive PID controller reported by Pramudijanto et al. (2015), the RMSE was computed using

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^N e(k)^2}{N}}, \quad (10)$$

resulting on a value of 10.79 for similar-to-step references. In this work, the RMSE was computed with (10) as well resulting on a value of 8.41 for larger true-step references, which is 22% less than the RMSE reported by Pramudijanto et al. (2015). Now considering Demir et al. (2019), it is worth remembering that the authors used the PID functional block available in their programming environment, meanwhile in this work, the full control algorithm was developed from scratch. Figure 10 shows the speed regulation plots obtained by Demir et al. (2019), where it can be observed that the AC motor speed reached the steady state at the desired value after 40 seconds from 0 to 1000 [RPM]. In contrast in this work, the steady state at the desired value was achieved in 18 seconds from 0 to 1750 [RPM]. Hence, the results presented in this work overcome those obtained by Demir et al. (2019) in terms of faster response for larger errors, namely, the proposed controller reduces 12 seconds the set point steady state accomplishment for a 75% larger error.

4. CONCLUSIONS

In this work, the implementation of a closed-loop controller to regulate the shaft speed of a three-phase AC motor was presented. Such an implementation was performed using only industrial-purpose hardware, which is an advantage over the state-of-the-

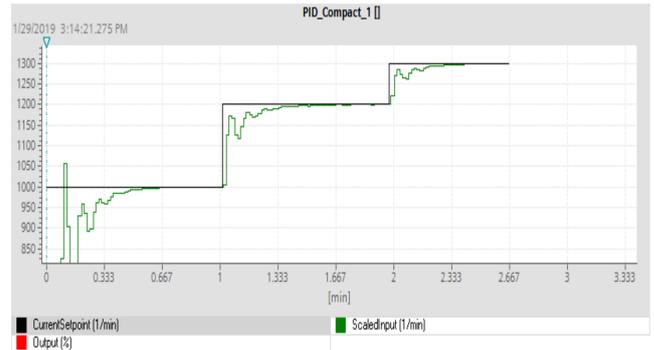


Figure 10. Results obtained by Demir et al. (2019)

art approaches so far, in addition to the completely novel use of a Modbus network to perform a digital control system for an /11/202. The control system technique used was a PI controller, whose performance and robustness were evaluated by way of the following experiments: 1) commanding large set-points to the PI controller to verify its effectiveness throughout the whole error signal span; 2) comparing whether or not using the integral action in order to highlight its necessity for disturbance rejection.

From the first experiment, the results are considered successful since the controller is capable to lead the shaft speed to a desired value despite how far from the current condition is; besides, the steady state error is practically nullified.

For the case of the disturbance rejection assessment, it can be seen that the integral action works correctly, since the control signal increased to mitigate the effects of the disturbance and it reduced the IAE and ITAE performance indices as well. This leads to the conclusion that the integral action would be helpful to maintain the commanded speed despite the presence of a constant load on the shaft, for instance, using the AC motor to actuate a conveyor belt or to move another type of machine.

Finally, the obtained results from speed regulation can be considered superior with respect to the state of the art since the RMSE value at steady-state error was reduced 22% with respect to the results presented by Pramudijanto et al. (2015) and the steady state at the desired set point was accomplished 12 seconds earlier than the controller presented by Demir et al. (2019) for a 75% larger error.

From the successful results of these experiments, a correct operation and performance of the Modbus network can be concluded as well. All the set of these promising results encourages the

use of only industrial-purpose networked hardware to implement more complex control systems rather than traditional high-cost academic-purpose hardware and software, which are less interesting for manufacturing industry in Mexico.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Universidad Autónoma de la Ciudad de México for supporting the project UACM CCYT-2023-IMP-02. This contribution is part of the results of such a project. In addition, the National Researcher Candidate with CVU No. 319148 thanks the National Humanities, Science and Technology Council (CONAHCYT) for the support given.

REFERENCES

- Al-Manfi, A. A. (2019). Implementation of remote self-tuning fuzzy PID controller for induction motor through ethernet. *J. of Electrical Systems*, 15(1): 1059–1065. http://journal.esrgroups.org/jes/papers/15_1_2.pdf.
- Avdeev, B. A. and Vyngra, A. V. (2020). Simulation of variable frequency controlled AC induction motor operating on non-linear load. In *Proc. of IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. pp: 2346–2349. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038963>.
- Awdaa, M., Obed, A., and Saleh, A. (2020). Three-phase induction motor SVPWM-FOC control based on PLC Matlab translation approach. In *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. pp: 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012028>.
- Balestrino, A., Landi, A., Medaglia, M., and Satler, M. (2006). Performance indices and tuning in process control. In *Proc. of IEEE 14th Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED)*. pp: 1–6. <https://doi.org/10.1109/MED.2006.328852>.
- Bhatti, S. A., Malik, S. A., and Daraz, A. (2016). Comparison of PI and IP controller by using Ziegler-Nichols tuning method for speed control of DC motor. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Systems Engineering (ICISE)*. pp: 330–334. <https://doi.org/10.1109/INTELSE.2016.7475144>.
- Bolton, W. (2021). *Instrumentation and Control systems*. Newnes.
- Demir, M. C., Cengiz, T., and Eminoğlu, İ. (2019). Experimental setup for AC motor speed control by using PLC. *J. of Scientific Perspectives*, 3(3): 177–188. <https://doi.org/10.26900/jsp.3.018>.
- Dukare, P. D. and Jagtap, P. (2017). Induction motor control by stator voltage control method using PLC: A review. *Int. Research J. of Engineering and Technology*, 4(4): 92–95. <https://www.irjet.net/archives/V4/i4/IRJET-V4I422.pdf>.
- Howimanporn, S., Thanok, S., Chookaew, S., and Sootkaneung, W. (2016). Speed control technique for conveyor using PSO based PID with programmable logic controller. In *Proc. of IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII)*. pp: 670–675. <https://doi.org/10.1109/SII.2016.7844076>.
- Landau, I. D. and Zito, G. (2010). *Digital control systems: design, identification and implementation*. Springer.
- Mahesh, K. and Ramachandra, B. (2017). Speed control of three phase induction motor using PLC under open and closed loop condition. *Int. J. Engineering Research Applications*, 7(1): 34–39. <https://doi.org/10.9790/9622-0701043439>.
- Moudgalya, K. M. (2007). *Digital control*. John Wiley & Sons.
- Nicola, M. and Nicola, C.-I. (2021). Tuning of PI speed controller for PMSM control system using computational intelligence. In *Proc. of IEEE 21st Int. Sym. on Power Electronics (EE)*. pp: 1–6. <https://doi.org/10.1109/Ee53374.2021.9628297>.
- Ogata, K. (2015). *Discrete-time control systems*. Pearson.
- Pramudijanto, J., Ashfahani, A., Fatoni, A., and Nugroho, S. A. (2015). PLC-based PID-predictive controller design for 3-phase induction motor on centrifugal machine for sugar manufacturing process. In *Proc. of IEEE Int. Con. on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture, and Industrial Automation (ICAMIMIA)*. pp: 49–52. <https://doi.org/10.1109/ICAMIMIA.2015.7508001>.
- Saad, N. and Arrofiq, M. (2012). A PLC-based modified-fuzzy controller for PWM-driven induction motor drive with constant V/Hz ratio control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2): 95–112. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.07.001>.
- Ustun, S. V. and Demirtas, M. (2009). Modeling and control of V/f controlled induction motor using genetic-ANFIS algorithm. *Energy conversion and management*, 50(3): 786–791. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.032>.
- Vadi, S., Bayindir, R., Toplar, Y., and Colak, I. (2022). Induction motor control system with a programmable logic controller (PLC) and profibus communication for industrial plants—An experimental setup. *ISA Transactions*, 122: 459–471. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.04.019>.
- Velagic, J., Kaknjo, A., Osmic, N., and Džananovic, T. (2011). Networked based control and supervision of induction motor using OPC server and PLC. In *Proc. of IEEE Int. Symp. on Electronics in Marine (ELMAR)*. pp: 251–255. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6044283>.
- Verma, P. and Potdar, R. M. (2017). A review on AC drive controller using PLC. *Int. J. of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 5(9): pp: 53–55. <https://doi.org/10.17148/IJIREICE.2017.5913>.

BIOGRAPHIES



Martín Rodríguez. In 2010 he obtained the Bachelor degree in Mechatronics Engineering from the Polytechnic University of Aguascalientes. Since 2014, he is associate professor at the Mechatronics Engineering Department of the Technological University of Northern Aguascalientes. His research interests are robotics, industrial automation, computer vision and lean manufacturing

systems. He has participated as coach in several contests and he has been invited to deliver conferences and tutorials related to robotics and automation.



Mario Baes. In 2023, he obtained the Technical Degree in Mechatronics with speciality in Automation from the Technological University of Northern Aguascalientes in Mexico, working with industrial communication protocols for diverse applications. He is currently enrolled as undergraduate student in the Mechatronics Engineering program at the same institution, where he still collaborates

in several research projects related to industrial automation.



Ricardo Jara. In 2011 he obtained the Bachelor degree in Mechatronics Engineering from the Polytechnic University of Aguascalientes. He got the Master of Science degree in Electrical Engineering from the Research and Advanced Studies Center of the National Polytechnic Institute in Guadalajara in 2016. Since 2017, he is associate professor at the Technological University of

Northern Aguascalientes, collaborating in the Mechatronics Engineering department. His research aims to develop projects regarding automatic control.



Yadira López. She obtained the Bachelor degree in Electronics Engineering in 2009 from the Aguascalientes Institute of Technology. In 2012, she was awarded with the Master of Science degree in Electrical Engineering from the same institution. In 2022 she got the doctoral degree from the University of Guadalajara, and since 2015 she is full professor

at the Technological University of Northern Aguascalientes, where she also leads the Academic Group of Mechatronic Systems. Her research interests are the interferometry and the optical instrumentation.



Santos Orozco. In 2020, he obtained the Doctor of Science degree in Automatic Control from the Research and Advanced Studies Center of the National Polytechnic Institute in Mexico City, developing robust controllers for humanoid robots and drones, and collaborating with important robotics laboratories in Germany and France. From 2020 to 2022 he worked as a researcher at the PRISMA

Lab of the University of Naples in Italy, developing control systems for aerial manipulators. Currently he is full professor at the Science and Technology College of the Autonomous University of Mexico City. His research interests are the automatic control theory and its applications.

Artificial Neural Network Model to Predict the Factor of Safety in Earth Dams Subjected to Rapid Drawdown

Flores Berenguer, Isaida^{1*} ; González Haramboure, Yoermes² ; García Tristán, Jenny³ ; Rosete Suárez, Alejandro⁴ 

^{1, 3} *Technological University of Havana "José Antonio Echeverría", Faculty of Civil, Havana, Cuba*

² *National Institute of Hydraulic Resources, Havana, Cuba*

⁴ *Technological University of Havana "José Antonio Echeverría", Faculty of Informatics, Havana, Cuba*

Abstract: Rapid drawdown has been identified as one of the most frequent causes of slope failures due to the effects associated with drought and operational changes when incorporating hydroelectric plants, which influence the filling level of earth dams. The main goal of this research is to obtain predictive models based on Artificial Neural Networks that return the factor of safety of the upstream slope in homogeneous earth dams in the face of the effect of rapid drawdown. Three geometries and 40 soils were defined to form the embankment, from which hybrid numerical models of transient water flow with unsaturated soils were built, considering three discharge speeds. From these results, a database was built to develop the predictive models, by means of the KNIME program and an algorithm based on Artificial Neural Networks. The behavior of the factor of safety as a function of time is also analyzed to establish its recovery intervals. Main results show that the minimum factor of safety is obtained between 52 % and 88 % of the total drawdown time. Regarding the predictive models, the adjusted R^2 determination coefficients were greater than 95 % in all cases and the errors remained below 10 %. This demonstrates a high effectiveness of this algorithm and the validity of its application to geotechnical problems.

Keywords: earth dams, slope stability, factor of safety, rapid drawdown, artificial neural networks

Modelo de Redes Neuronales Artificiales para Predecir el Factor de Seguridad en Presas de Tierra Sometidas a Desembalse Rápido

Resumen: El desembalse rápido se ha identificado como una de las causas más frecuentes de las fallas en taludes debido a los efectos asociados a la sequía y a los cambios de operación al incorporar hidroeléctricas, los cuales influyen en el nivel de llenado de las presas de tierra. Esta investigación tiene como objetivo fundamental la obtención de modelos predictivos basados en Redes Neuronales Artificiales que devuelvan el factor de seguridad del talud aguas arriba en presas de tierra homogéneas ante el efecto del desembalse rápido. Se definieron tres geometrías y 40 suelos para conformar el terraplén, a partir de los cuales se construyeron modelos numéricos híbridos de flujo de agua transitorio con suelos no saturados, considerando tres velocidades de desembalse. A partir de estos resultados, se construyó una base de datos para desarrollar los modelos predictivos, a través del programa KNIME y un algoritmo basado en Redes Neuronales Artificiales. Se analiza, además, el comportamiento del factor de seguridad en función del tiempo para establecer sus intervalos de recuperación. Los principales resultados muestran que el factor de seguridad mínimo se obtiene entre el 52 % y el 88 % del tiempo total de desembalse. En cuanto a los modelos predictivos, los coeficientes de determinación R^2 ajustados fueron superiores al 95 % en todos los casos y los errores se mantuvieron por debajo de 10 %. Se demuestra una alta efectividad en este tipo de herramienta y la validez de su aplicación a problemas geotécnicos.

Palabras clave: presas de tierra, estabilidad de taludes, factor de seguridad, desembalse rápido, redes neuronales artificiales

1. INTRODUCTION

Since ancient times, the availability of water has been a limiting factor for the development of society, which has forced man to build structures for the use and management of

water resources. The dams built around the world represent fundamental solutions to meet this objective (Toapaxi et al., 2015).

*isiflores92@gmail.com
Recibido: 12/12/2023
Aceptado: 22/03/2024
Publicado en línea: 01/08/2024
10.33333/tp.vol54n1.04

CC 4.0

The complex behavior of soil and rock as construction materials limits the understanding of their applications in engineering projects. For this reason, engineering designs are based on fundamental principles of simplification, where part of their characteristics is assumed. Sometimes this means that the behavior of the soil is underestimated or overestimated in design work (Shahin, 2016).

Recently, the construction industry has seen a rise in utilizing technological information for data collection and analysis (Shahin, 2016). These results have caused the growth of the use of Artificial Intelligence techniques to solve complex engineering problems (Jong et al., 2021).

In analyzes related to slope stability, Factor of Safety (FS) is the index that allows establishing when a slope is stable or not for certain conditions. When obtaining the FS, only elements related to the properties of soils and geometry of the analyzed structure were originally included. However, in recent years, it has been necessary to add external load elements directly associated with loss of stability of these structures (Alfatlawi et al., 2020; Nanekaran et al., 2023).

During a period of prolonged drought, the water level of earthen dams is significantly reduced, which in turn causes a decrease in the FS on the upstream slope, if the rate of descent of the water level is large enough. This loss of stability may or may not be associated with collapse phenomena, which would cause other undesirable consequences that could lead to the loss of human lives and material resources (Bongiorno et al., 2015; Flores et al., 2020). The phenomenon of drawdown in dams can also occur due to the careless operation of intake works after the placement of small hydroelectric plants, so that it is essential to review this behavior to prevent failures that could become disastrous (Haramboure et al., 2021). In the transient analysis, the variability of the flow load involved is considered, contrary to what was proposed for steady flow conditions. This variation in loads occurs due to changes in boundary conditions associated with the variation of water levels over time (Alonso & Pinyol, 2016; Boushehrian et al., 2017; Flores et al., 2022).

When considering the loading state caused by rapid drawdown inside the embankment of earthen dams, Boushehrian et al. (2017) study the parameters linked to the dissipation of pore pressures during them. Romer et al. (2019) establishes that the pore pressures within the dam embankment cannot be completely dissipated during the release, a criterion verified by Pinyol et al. (2013). Pinyol et al. (2008) studied the effect of drawdown considering its effect on the degree of saturation, showing a high similarity between the numerical models and the piezometric readings in the dams, in turn, they established a relationship between the water level inside the embankment and the duration of the event.

It should be taken into account that the effect of the drawdown on the FS with respect to the time and duration of the phenomenon, causes a recovery of the FS value, linked to dissipation of pore pressures inside the embankment during drawdown event. To establish a definitive criterion for the cases analyzed all FS results were normalized as a function of time in an interval between 0 (initial moment) and 1 (final

moment); as shown in Equation 1. Normalization has shown its usefulness in preprocessing to apply mining techniques, including clustering algorithms, artificial neural networks, and classification (Kim et al., 2014; Patra & Basudhar, 2003; Singh et al., 2023).

$$X_N = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

Where X_N is the resulting normalized value; X is the original value obtained; X_{min} is the minimum value of the data set and X_{max} is the maximum value of the data set.

Traditionally, in the design and construction of earth dams, the critical condition of total saturation is taken into account. However, throughout the useful life of these structures, events appear that put stability at risk and are related to states of partial saturation of soil in the embankment. Rapid drawdown classifies as one of these events. Once the drawdown phenomenon occurs, it is possible to apply the criteria of the unsaturated soil mechanic, describing in a more realistic way the behavior of part of the upstream slope. To model the effect of unsaturated soils on slope stability, it is necessary to include suction as a fundamental variable that describes this behavior, which is represented by the soil characteristic curve (Bhaskar et al., 2022).

Soil characteristic curves are obtained using Aubertin et al. (2003), described in Equation 2.

$$S_r = S_c + S_a^* \times (1 - S_c) \quad (2)$$

Where S_r is the saturation degree; S_c is the saturation degree due to capillary forces and S_a^* is the limited degree of saturation due to adhesion (S_a) (Equation 3).

$$S_a^* = (1 - S_a) + 1 \quad (3)$$

Adhesive component is associated with a thin film of water that covers surface of the grain and depends on the basic properties of the material, such as: the negative pressure of pore water in the soil, size of the particles, shape coefficient and porosity. The adhesive component is a limited value, since it is possible that at low suctions the value of S_a is greater than 1; so, the bounded value ensures that for $S_a \geq 1$, $S_a^* = 1$ and if $S_a < 1$, $S_a^* = S_a$ (Equation 4)

$$S_a = aC_\psi \frac{\left(\frac{h_{co}}{\psi_n}\right)^{2/3}}{e^{1/3} \left(\frac{\psi}{\psi_n}\right)^{1/6}} \quad (4)$$

Where a is the curve fitting parameter, considered as 7×10^{-4} for cohesive soils; ψ is the suction; ψ_n is the suction term introduced to ensure a dimensionless component; e is the void ratio of the soil and h_{co} is the average capillary elevation (cm) determined for capillary soils, obtained by Equation 5 for granular soils and with Equation 6 for cohesive soils, referring its remaining variables in Equations 7 and 8.

$$h_{co} = \frac{b(cm^2)}{e \times D_{10}(cm)} \quad (5)$$

$$h_{co} = \frac{\xi \times (LL)^{1.75}}{e} \quad (6)$$

D_{10} is the diameter corresponding to 10 % of the granulometric curve.

$$b(cm^2) = \frac{0.75}{1.17 \times \log C_u + 1} \quad (7)$$

$$\xi \approx 0.15 \rho_s \quad (8)$$

Where $b(cm^2)$ is the parameter associated with the uniformity coefficient for granular soils; C_u is the uniformity coefficient; LL is the liquid limit; ξ is the parameter associated with the density for cohesive soils and C_ψ is the correction coefficient that allows reducing the water content for high suctions, based on that proposed by Fredlund & Xing (1994), obtained through Equation 9.

$$C_\psi = 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{\psi_0}{\psi_r}\right)} \quad (9)$$

Where ψ_0 is the initial suction, considered equal to 10^{-7} cm and ψ_r is the suction corresponding to the residual water content at which point an increase in suction will not remove more water from the soil, and is given by Equation 10 for cohesive soils.

$$\psi_r = 0.86 \left(\frac{\xi}{e}\right)^{1.2} \times LL^{1.74} \quad (10)$$

From the characteristic curves of unsaturated soils, the hydraulic conductivity functions are obtained using the method of Fredlund et al. (1994), shown in Equation 11.

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln\psi}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln\psi_{aev}}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (11)$$

Where $k_r(\psi)$ is the function of hydraulic conductivity with respect to suction; b is the upper limit of integration considered as $\ln(1\ 000\ 000)$; ψ is the soil suction; e is the Euler natural number (2.71828); y is the dummy integration variable that represents the logarithm of the suction; θ' is the derivative of the Fredlund & Xing (1994) model that fits the soil characteristic curve; $\theta(\psi)$ is the soil characteristic curve; ψ_{aev} is the air input value to the soil and θ_s is the volumetric water content of the soil.

One of the fundamental problems in the study of slope stability in earthen dams using numerical models is the number of independent variables that can be associated with failures (Boushehrian et al., 2017; Haramboure et al., 2021; Komasi et al., 2019), which limits the ability to generalize research when the conditions for which a specific model was generated change.

In recent years, hybrid numerical models have been used, which combine transient water flow analyzes using the Finite Element Method (FEM) with slope stability analysis using any

of the Limit Equilibrium Methods (LEM) (Jasim et al., 2017; Vahedifard et al., 2020). However, the need for generalization in the response to highly complex geotechnical problems results in the need to create prediction tools. This new approach has been promoted in recent years by the application of AI algorithms (Beiranvand & Komasi, 2021; Wengang et al., 2023).

The primary link between AI and numerical models is since, to get a machine to operate and return the expected results, it is necessary to carry out a training and testing process, which is directly associated with the numerical models, if a supervised process. AI models, particularly supervised learning models, can be trained with the results obtained from numerical models. In this way, the AI model can become an alternative that can replace costly repeated executions of numerical models.

Currently, the implementation of Artificial Neural Network (ANN) tools for the study of engineering problems, specifically the slope stability, has gained popularity internationally. Various authors (Beiranvand et al., 2019; Flores et al., 2021; Komasi et al., 2019; Nanekaran et al., 2023; Salazar et al., 2015; Santillán et al., 2014) have used them to predict phenomena associated with slope stability, obtaining relevant results. These studies have shown that ANNs are one of the algorithms with the best results for solving slope stability problems. For this fundamental reason, it is selected to obtain the prediction models proposed in this research.

The construction of ANNs is based on the way biological systems process, where neurons are a set of basic units, in which information is processed to obtain a response. Neurons store information by establishing synaptic weights between the input variables of the system, which results in an iterative process directly linked to its training.

In the present research, ANN structures are implemented to predict the FS in homogeneous earth dams subjected to rapid drawdown processes. Hybrid numerical models are carried out for various conditions that range from the geometry to the speed of the discharge, including the physical and mechanical properties of the component soils of the embankment of the earth dams studied. The fundamental results show a high effectiveness of the ANN models implemented for all established time steps.

The fundamental meaning of this study lies in obtaining tools for predicting slope stability before rapid drawdown processes with ANN combined with the results obtained from numerical modeling. Managing to link during this study to partially saturated soils in the analyses. The variability of the geotechnical properties of soils is a determining element in the need to implement tools of this type given their generalization capabilities.

2. METHODOLOGY

Three fundamental geometries are established for the study, corresponding to dams of 15, 30 and 40 meters high on the

embankment. They all have drainage prisms and a foundation considered waterproof and non-deformable, since it is the object of study in the stability analysis.

The behavior of the embankment was studied in 40 different soil variants (Flores et al., 2023), all classified as high or low compressibility clays (CL or CH) according to the Unified Soil Classification System (SUCS), and whose minimum, average and maximum values of the main geotechnical parameters are shown in Table 1.

Table 1. General properties of embankment soils

	Specific weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Permeability (m/s)
Minimum	16.6	13.8	12.6	4.3×10^{-8}
Half	18.3	31.2	17.6	7.7×10^{-7}
Maximum	19.4	67.5	29.5	7.7×10^{-6}

The characteristic curves of all modeled soils are included (Figure 1), obtained using the method of Aubertin et al. (2003).

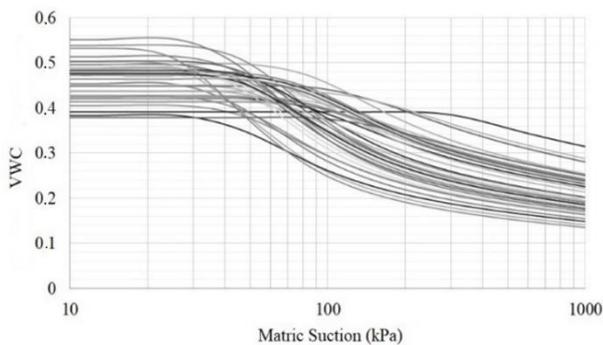


Figure 1. Characteristic curves of the embankment soils

From the characteristic curves of unsaturated soils, the hydraulic conductivity functions are obtained using the method of Fredlund et al. (1994).

To define the external load associated with rapid discharge, three speeds of decrease in the water level are established: 0.10 m/day; 0.15 m/day and 0.30 m/day. Consequently, it is considered in all cases that the dams contain the projected normal filling level, which corresponds to the height of the embankment minus three meters of free edge; and they will be unloaded until they are completely empty.

2.1 Database from hybrid numerical models

Construction of the database necessary for the implementation of ANN algorithms is obtained using the results corresponding to numerical models. In this case, a two-dimensional plane strain analysis is used, since the longitudinal displacements are constant and the variation of the strains with respect to the length can be considered null, therefore, the analysis is

simplified from a mathematical and computational point of view (Fredlund et al., 2019).

In this research, the computational simulation proposed is a hybrid type. All the analyzes of the transient leaks were obtained using the Finite Element Method (FEM) and the stability studies were obtained by the use of the Morgenstern-Price Method, as one of the most precise among the Limit Equilibrium Methods (LEM) (El-Hazek et al., 2020; Jasim et al., 2017; Vahedifard et al., 2020). All of the above is done in the GeoStudio (2018) program.

The result of combining three heights for the embankment (15, 30 and 40 meters), with their associated geometric characteristics, as well as 40 combinations of soils and three discharge speeds (0.1, 0.15 and 0.3 m/day) yield a total of 360 models. It is taken into account that the FS were obtained daily and that the relationships between speed and height establish diversity in terms of duration for each case. Finally, the resulting database will have a total of 1.46×10^3 sets of input variables with their respective FS as the response variable.

2.2 Nodal structure applied in KNIME

This section presents a model to estimate the FS from the data obtained using the numerical models previously described. For this prediction, perceptron-type RNA with forward feedback is used. To apply the ANN model, the computational tool KNIME (or Konstanz Information Miner) is used (Anting, 2022; Ganasan et al., 2021), which allows the development of models in a visual environment.

The KNIME program is conceived as a graphical tool and has a series of nodes (that encapsulate different types of algorithms) and arrows (that represent the flow of data) that are displayed and combined in a graphical and interactive way, solving optimization problems using metaheuristics. With the application of various nodes, previously implemented, non-linear problems of a predictive nature can be modeled that can be described with mathematical functions without the need for programming knowledge. To do this, the work structure shown in Figure 2 is established, determined from the proposal by Achong & Guntor (2021).

Of the total numerical modeling results, 13 input variables are defined and 360 models are obtained. The description of these variables, maximum value, minimum value and average value, are shown in Table 2.

Additionally, a general analysis is included with the 13 initial variables and a simplified analysis maintaining only six variables. The incorporation of a simplified analysis is due to the fact that, on occasions, it is not possible to have all the geotechnical data collected in the initial model. This would imply the impossibility of applying these results in the future.

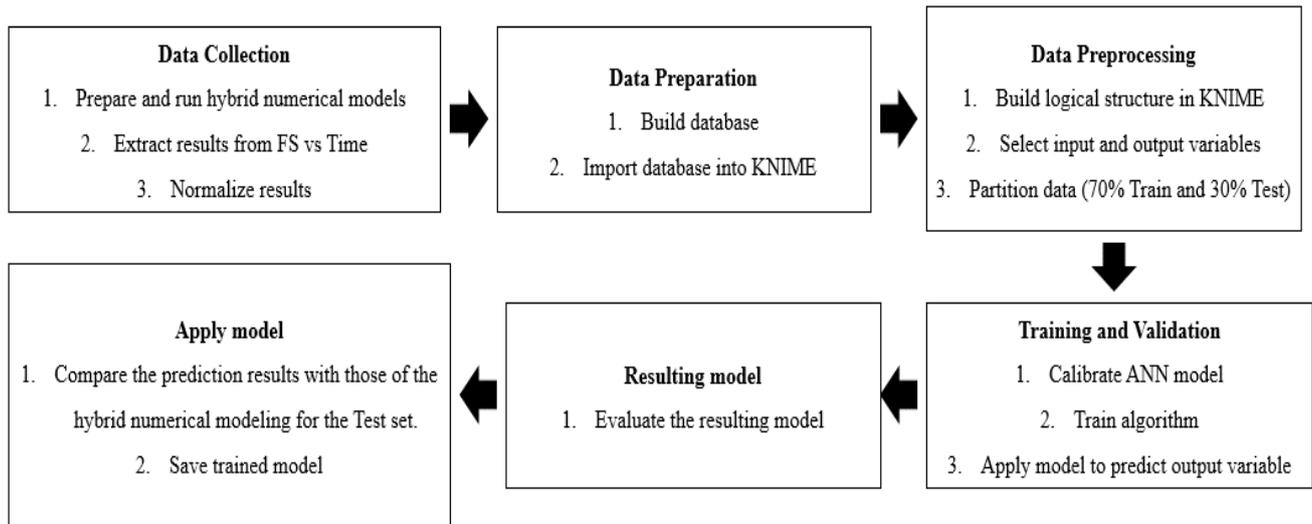


Figure 2. Implemented work methodology for the use of machine learning in the prediction of FS under rapid drawdown

Table 2. Input variables defined for the application of the ANN model

Variable	Minimum	Half	Maximum
Embankment height (m)	15	30	40
Crown width (m)	4	-	6
Specific weight (kN/m ³)	16.58	18.31	19.39
Cohesion (kPa)	13.84	31.20	67.45
Internal friction angle (°)	12.55	17.58	29.46
Saturated permeability (m/s)	4.29×10^{-8}	7.68×10^{-7}	7.75×10^{-6}
Volumetric water content	0.378	0.458	0.553
Volumetric compressibility index (kPa ⁻¹)	4.00×10^{-5}	8.66×10^{-5}	1.90×10^{-4}
Effective diameter for 60 % (mm)	7.50×10^{-3}	8.66×10^{-3}	0.25
Effective diameter for 10 % (mm)	2.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}	0.027
Liquid limit (%)	33.25	53.55	72.05
Speed (m/day)	0.10	0.15	0.30
Time (%)	0 %	50 %	100 %

Therefore, by presenting a simpler model, with fewer input geotechnical variables, a greater possibility of data being available in other cases is more feasible. For all these reasons, the following are selected: height of the embankment, fundamental physical-mechanical properties (specific weight, cohesion and angle of internal friction), speed drawdown and time.

Of the total of the resulting numerical models, 70 % of them are established for training and the remaining 30 % are used to

test the ANN models obtained (Beiranvand et al., 2019; Jabbar & Muataz, 2021). This partition is done randomly using a node available in KNIME with this function.

2.3 ANN Calibration

A perceptron-type ANN with forward feedback is used (Bui et al., 2019; Flores et al., 2021; Maneta & Shnabel, 2003; Montoya, 2018; Santillán et al., 2014). The main idea of RPOP is to accelerate the minimization of error in the neural networks learning process by using a local approach for weight-updating that overcomes some negative aspects of the pure gradient-based approach. Initially this node (RPROP) has a default configuration (Riedmiller & Braun, 1993); however, it is necessary to carry out a calibration process to obtain the optimal number of neurons and hidden layers for the phenomenon analyzed as shown in Figure 3.

As shown in Figure 3 the structure resulting from this analysis is composed of 1×10^4 iterations, 2 hidden layers and 10 neurons per layer, for both proposed models. Furthermore, for both configurations with the selected structure, an adjusted coefficient of determination R^2 greater than 97 % and errors close to 8 % are obtained. The final structure resulting from this analysis for both proposals is shown in Figure 4. The details and hyperparameters associated with the implemented RPROP algorithm were described by Riedmiller & Braun (1993).

The error obtained in the training phase was 1.107 for the general model and 1.120 for the simplified model. Based on the criterion established by Riedmiller & Braun (1993), they state that if the error reaches values of up to 1.2, it can be considered a good fit for the trained AN.

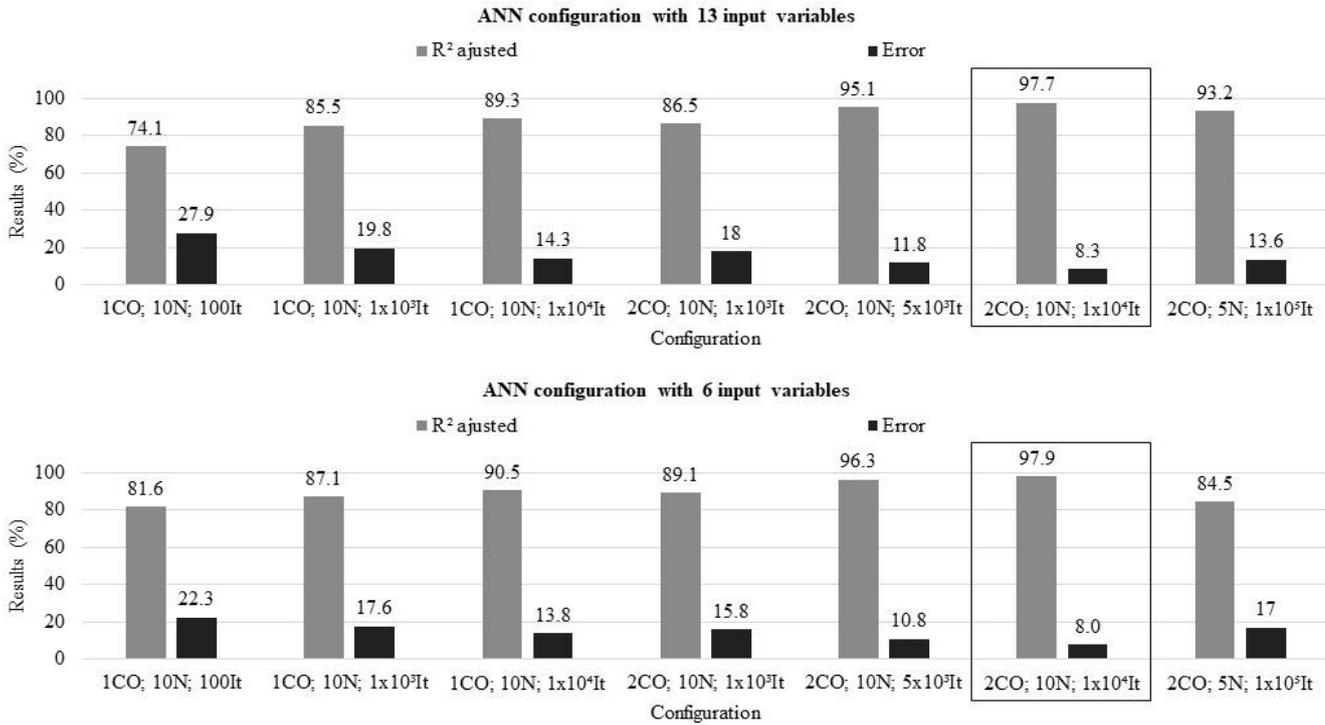


Figure 3. Tested configurations for calibrating Artificial Neural Network for rapid drawdown

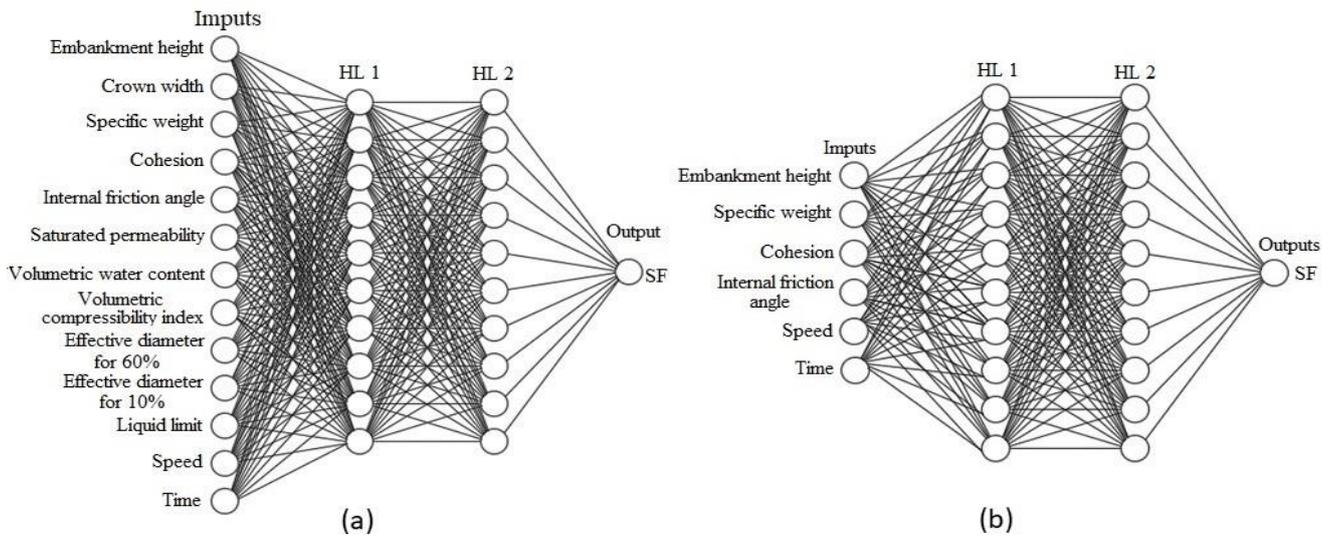


Figure 4. Artificial Neural Network structures implemented for rapid drawdown (a) with 13 input variables and (b) with six input variables

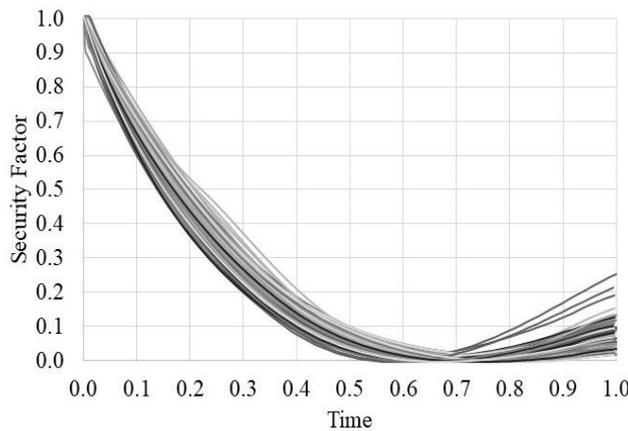


Figure 5. Behavior of the FS as a function of time for the 30-meter geometry

In Figure 5 the decrease in FS during rapid drawdown is abrupt. When up to 20 % of the total time has passed the FS has decreased between 50 % to 60 % compared to its initial value (always greater than 1.5; therefore, it is considered stable and safe). Then between 20 % and 50 % of the total time the decrease in FS reaches values between 60 % and up to 100 % potentially endangering the safety of the slope (if values lower than 1 are reached during the process) with the own repercussions related to its possible failures. However, the maximum recovery of FS does not exceed 30 % of the initial value oscillating mostly below 15 %.

This behavior is sustained for the geometries of 15 and 40 meters of embankment height which is reflected in Table 3, which shows the extreme values of FS recovery as a function of time for all the cases studied.

Table 3. FS recovery intervals as a function of time for the three geometries studied

	15 meters	30 meters	40 meters
Recovery time interval	52 %	56 %	56 %
	88 %	85 %	85 %

Additionally, it was observed that for the same geometry, there is a variation in these intervals when the speed of occurrence of the discharge is modified. However, this variation is less than 5 % in all the cases analyzed and for the three speeds considered so it is considered irrelevant for these analyses. From this study, it is recommended to take into account that the recovery interval of the FS during drawdown is wide (around 30 % of the time) a behavior that can be associated with the fluctuation of the physical-mechanical properties of the component soils of the embankment, in particular cohesion, a parameter that presents a high variability in the study despite the fact that all the soils studied are clays with similar classifications (CL or CH).

3.1 Predictive models with ANN

Understanding the internal functioning of ANNs and how the model is obtained is extremely complex and currently receives a lot of attention (Barredo-Arrieta et al., 2020). In fact, the field of Explainable AI (XAI) is dedicated to trying to make understandable these models, which achieve high precision but are difficult to understand. For all these reasons, Table 4 shows the results corresponding to the biases and the weights corresponding to the simplified model.

In Table 4, the colors show how the weights and bias are distributed between the neurons of the different layers of the ANN. The intermediate layers of ANNs do not have a predefined meaning, but rather function as hidden characteristic variables that the model detects from the data (Barredo-Arrieta et al., 2020). It is observed (Table 4) that the weights with small values, close to 0 (in yellow) are the predominant ones in the model. In this case, this behavior is observed in the first layer between variable 4 (velocity) and neuron 7. Extremely negative values (in red) mean that the neuron opposes the values taken by the corresponding variable. Extremely positive values (in green) mean that the

neuron adds to the values of the corresponding variable. In the first layer there are no high addition relationships between any of the variables. However, in the second layer, these addition relations are presented in variables 0 and 8. As for the third layer (output), the red values of neuron 8 imply that the growth of this variable is inversely proportional to the value of the FS. Once the training of each of the applied ANN structures has been carried out the test results are shown between the numerical model and the prediction obtained for the configuration with 13 and six input variables (Figure 6).

From the results shown in Figure 6, a good fit between the original values and those predicted by the tool for these analyses can be considered. The robustness of the predictions concerning the results obtained with the numerical model guarantees high precision when applying tools based on Artificial Intelligence such as ANN to solve complex geotechnical problems such as the stability of slopes against the effects of rapid drawdown. Furthermore, the results presented in this research guarantee two approaches: a general one, which includes all the soil parameters involved in the analysis and a simplified one, which is of vital importance, since it is known that it is not always possible to have all the variables geotechnical techniques resulting from soil studies. The nodes trained from this analysis can be used to make other predictions for cases not considered in this research.

4. CONCLUSIONS

Rapid drawdown can be caused by phenomena such as drought or operational changes. Hybrid modeling of this phenomenon to obtain FS on earthen dam slopes allows modeling these transient water flow problems, considering unsaturated soils. In these cases, the reduction of the FS is observed with the consequent loss of stability and safety of the upstream slope.

A meticulous examination of results derived from numerical models enables a discerning evaluation of the fluctuation in FS during rapid drawdown processes, as outlined in the cited literature. This underscores the imperative to delve into the study of this phenomenon and its potential ramifications for the optimal operation of reservoir.

Thorough analyses and numerical normalization within the 0 to 1 scale reveal distinct trends. The rapid decline in FS is notably abrupt, especially within the initial 20 % of the total elapsed time, resulting in reduction of approximately 60 % FS. The pivotal points, marking the minimum FS, occurs within the 50 % to 90 % timeframe of the overall drawdown duration. This phase is followed by a recuperative period, associated with the stabilization of pore pressures within the embankment. Substantially, the FS recovery typically does not surpass 15 % of the previously attained minimum FS.

The intervals of FS recovery exhibit slight variation (less than 5 %) for identical geometries, contingent on the drawdown velocity. Consequently, these intervals are not deemed representative for the analyses. The notable fluctuations in FS recovery values are linked to the variation in the physical-mechanical properties of the constituent soils within the embankment.

Table 4. Bias and weights obtained for the simplified model

Layer 1										
From .. To	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bias	0.030	-0.066	0.843	1.454	0.476	-9.626	8.511	-7.110	2.291	-10.835
0	0.019	-0.466	0.939	-0.635	-0.037	0.039	0.046	-0.800	0.307	0.011
1	-0.607	-0.297	0.232	0.176	0.307	0.272	-0.751	-0.302	-0.792	-0.617
2	0.097	-1.024	0.535	0.781	-0.071	0.042	-0.047	-0.411	0.049	0.833
3	0.187	-0.775	1.462	-1.427	-0.137	0.029	0.070	0.584	-0.105	0.126
4	2.020	-0.947	0.068	0.079	0.925	0.809	1.406	-44.429	2.469	-4.906
5	-0.158	-0.693	1.055	-0.002	-0.001	0.039	0.053	0.499	0.003	-0.001
Layer 2										
From .. To	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Bias	-0.360	1.663	0.155	8.620	-30.089	-1.880	0.470	-0.440	-0.493	1.316
0	-46.073	379.916	105.783	165.350	-535.732	-1 812.534	1.029	-3.517	-493.827	-5.212
1	0.427	0.023	0.025	-0.531	-1.176	-0.548	-0.788	-0.560	-0.799	0.520
2	-0.066	0.728	-0.209	8.448	-30.843	-2.677	0.265	0.001	0.119	0.081
3	-36.388	-2.262	0.296	-63.370	45.577	0.157	0.701	1.890	85.389	-3.731
4	14.036	-1.498	-1.273	-6.206	39.345	3.261	-2.786	1.446	-7.202	-0.960
5	10.342	17.420	-1.122	-11.172	0.379	1.062	-0.823	1.193	-2.927	-0.784
6	-15.857	-14.630	-4.783	2.096	-4.139	-0.674	0.985	0.337	3.487	-1.373
7	-0.368	-0.098	0.767	-0.590	65.012	-0.092	-0.019	-1.372	-0.431	0.631
8	432.344	-1.477	-0.196	257.829	7.994	0.455	-0.795	0.679	-1.977	201.731
9	2.476	-1.942	0.839	27.349	2.959	-0.307	-0.531	-0.085	-97.204	-1.113
Layer 3										
From .. To	0									
Bias	-0.115									
0	-1.873									
1	0.632									
2	0.583									
3	1.839									
4	-0.183									
5	-2.356									
6	2.125									
7	-0.993									
8	-129.721									
9	-0.915									

After carrying out the corresponding analyses, adjusted R^2 determination coefficients greater than 97 % and mean absolute errors close to 8 % were obtained for both applied ANNs. The results show that it is possible to successfully train and test ANN structures for complex geotechnical phenomena, such as the stability of slopes in earthen dams subjected to rapid drawdown.

The results obtained in this research can be used in subsequent research, as well as the trained and tested ANN models. In subsequent research, it is recommended to include other types of AI tools, as well as to study other complex phenomena that unfavorably influence the stability of slopes in dams, such as precipitation.

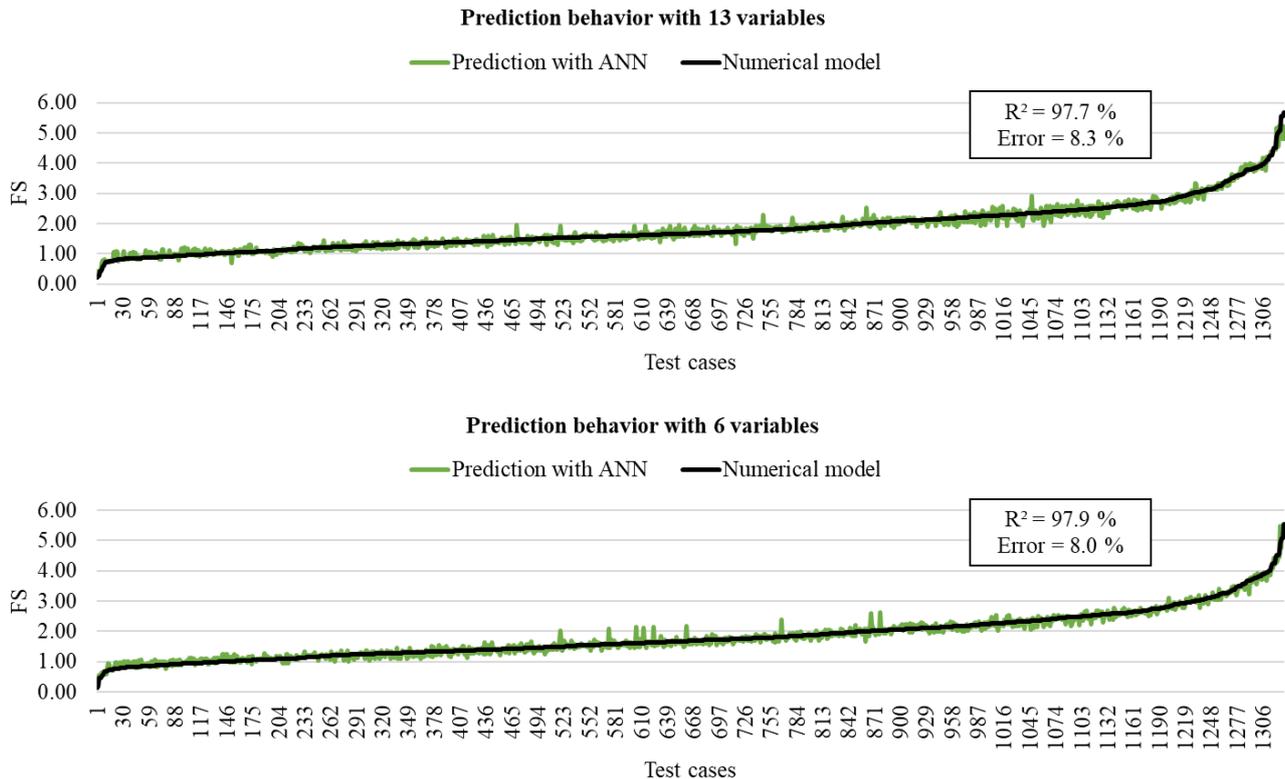


Figure 6. Relationship between the numerical model and the prediction with the Artificial Neural Network with 13 and six input variables for the Factor of Safety with rapid drawdown

REFERENCES

- Alfatlawi, T. J. M., Al-Temimi, Y. K., & Alomari, Z. M. (2020). Evaluation of the upstream slope stability of earth dams based on drawdown conditions - Khassa Chai Dam: A case study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012072>
- Alonso, E. E., & Pinyol, N. M. (2016). Numerical analysis of rapid drawdown: Applications in real cases. *Water Science and Engineering*, 9(3), 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2016.11.003>
- Anting, N. (2022). DATA SCIENCE with KNIME: Data Exploration, Machine Learning and Visualization using CODELESS Visual Programming. In *Data science with KNIME*.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussière, B., & Chapuis, R. P. (2003). A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, 1122, 1104–1122. <https://doi.org/10.1139/T03-054>
- Barredo-Arrieta, A., Díaz-Rodríguez, N., Del, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., Garcia, S., Gil-López, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts , taxonomies , opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58(December 2019), 82–115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
- Beiranvand, B., & Komasi, M. (2021). Study of the Arching Ratio in Earth Dam by Comparing the Results of Monitoring with Numerical Analysis (Case Study: Marvak Dam). *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 45(2), 1183–1195. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00519-1>
- Beiranvand, B., Mohammadzadeh, A., & Komasi, M. (2019). Effect of different parameters of heterogeneous dams on safety factor using the neural network . Case study : Marvak dam. *Nexo Revista Científica*, 32(2), 126–138. <https://doi.org/10.5377/nexo.v32i02.9263>
- Bhaskar, P., Puppala, A., & Boluk, B. (2022). Influence of Unsaturated Hydraulic Properties on Transient Seepage and Stability Analysis of an Earthen Dam. *Int. J. Geomech*, 22(7), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002414)
- Bongiorno, F., Angulo, N., & Belandria, N. (2015). Evaluación del Riesgo en Desprendimiento y Caracterización Geomecánica de los Taludes Rocosos en el Sector Quebrada del Diablo Mérida. *Revista Politécnica*, 36(3). Available in: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/659
- Boushehrian, A. H., Rezaee, A., & Vafamand, A. (2017). Studying the Effect of Horizontal Drains on Stability of Heterogeneous and Homogeneous Earth Dams during Rapid Drawdown Condition. *Journal of Structural Engineering and Geotechnics*, 7(1), 31–45.
- Bui, D. T., Moayedi, H., Gör, M., Jaafari, A., & Foong, L. K. (2019). Predicting slope stability failure through machine learning paradigms. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi8090395>

- El-Hazek, A. N., Abdel-Mageed, N., & Hadid, M. (2020). Numerical and experimental modelling of slope stability and seepage water of earthfill dam. *Journal of Water and Land Development*, 44(I_III), 55–64. <https://doi.org/10.24425/jwld.2019.127046.Abstract>
- Flores, I., Haramboure, Y. G., Días, J., & Tristá, J. G. (2022). Estudio de la estabilidad de taludes ante procesos de desembalse rápido en presas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLIII(03), 64–72. Available in: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.5af06550472049faafda0b4e8ff949ff&lang=es&site=eds-live&scope=site>.
- Flores, I., Hernández, F. M., Haramboure, Y., & Tristá, J. (2023). Relationship between soil physical-mechanical parameters and earth dam slope stability using stochastic and numerical modeling. *Geociencias*, 42(3), 387–402. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i3.17683>
- Flores, I., Tristá, J. G., & Haramboure, Y. G. (2020). Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 13–31. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612020000100013&lng=en&nrm=iso&tlng=es%0Ahttp://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0122-34612020000100013&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Flores, I., Tristá, J. G., & Haramboure, Y. G. (2021). Evaluación de la estabilidad de taludes en presas de tierra empleando Redes Neuronales Artificiales. *Revista de La Universidad de Zulia*, 32, 261–283. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.46925/rdluz.32.17>
- Fredlund, D., Xing, A., & Huang, S. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canada Geotechnical Journal*, 31, 533–546.
- Fredlund, D. G., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533–546.
- Fredlund, M., Mckeown, R., Lu, H., & Gitirana, G. (2019). Comparison of 2D and 3D anchor analysis methodologies. 1999, 359–367. https://www.researchgate.net/publication/340438381_COMPARISON_OF_2D_AND_3D_ANCHOR_ANALYSIS_METHODOLOGIES
- Ganasan, E., John, A., & Meng, L. (2021). Settlement Prediction Model in Consideration of Static Loading on Soft Clay by Utilising Machine Learning Method. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, 2(1), 551–560. <https://doi.org/https://doi.org/10.30880/rtcebe.2021.02.01.060>
- Haramboure, Y. G., Flores B., I., & Tristá, J. G. (2021). Efecto de desembalse en la estabilidad de presas de tierra : dos casos de estudio en Cuba . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XLII(1), 42–53. Available in: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsdoj&AN=edsdoj.bc970eb6c00a4b9ca277830ee2da395c&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Jabbar, A., & Muataz, I. (2021). Stability and Seepage of Earth Dams with Toe Filter (Calibrated with artificial neural network). *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(5), 3712–3725.
- Jasim, F. H., Vahedifard, F., Ragno, E., AghaKouchak, A., & Ellithy, G. (2017). Effects of Climate Change on Fragility Curves of Earthen Levees Subjected to Extreme Precipitations. *Geo-Risk*, 498–507.
- Jong, S. C., Ong, D. E. L., & Oh, E. (2021). State-of-the-art review of geotechnical-driven artificial intelligence techniques in underground soil-structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103946>
- Kim, J., Kwon, O.-I., Baek, Y., & Kim, C.-Y. (2014). A Study on the Variation of Ground Safety Factor by Earthworks. *The Journal of Engineering Geology*, 24(3), 333–341. <https://doi.org/10.9720/kseg.2014.3.333>
- Komasi, M., Mohammadzadeh, A., & Beiranvand, B. (2019). Optimization of horizontal drain dimensions in heterogeneous earth dams using Artificial Neural Network (ANN) (Case study : Marvak dam). *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 12, 109–116. <https://doi.org/10.22126/arww.2019.3817.1101>
- Maneta, M., & Shnabel, S. (2003). Aplicación de Redes Neuronales Artificiales para determinar la distribución espacial de la humedad del suelo en una pequeña cuenca de drenaje. Estudios preliminares. *Estudios de La Zona No Saturada Del Suelo*, VI, 295–304.
- Montoya, E. (2018). Metodología para la aplicación de Redes Neuronales Artificiales para sistemas de alerta de deslizamientos provocados por lluvias en regiones montañosas. *PhD Thesis*. Universidad de Brasilia.
- Nanehkar, Y. A., Licai, Z., Chengyong, J., Chen, J., Anwar, S., Azarafza, M., & Derakhshani, R. (2023). Comparative Analysis for Slope Stability by Using Machine Learning Methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app13031555>
- Patra, C. R., & Basudhar, P. K. (2003). Generalized solution procedure for automated slope stability analysis using inclined slices. *Geotechnical and Geological Engineering*, 21(3), 259–281. <https://doi.org/10.1023/A:1024923329646>
- Pinyol, M., Alonso, E. E., & Olivella, S. (2008). Rapid drawdown in slopes and embankments. *Water Resources Research*, 44, 1–22. <https://doi.org/10.1029/2007WR006525>
- Pinyol, N., Alonso, E. E., Corominas, J., & Moya, J. (2013). Influencia del desembalse en la estabilidad de una ladera. Caso Real. 37–39. *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Barcelona. Available in: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.dedup.wf.001..57c83103345e083529765aeac339b1f9&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Riedmiller, M., & Braun, H. (1993). A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The RPROP Algorithm. *IEEE Access*, 16, 586–591. [https://doi.org/O-7803-0999-5/93/\\$03](https://doi.org/O-7803-0999-5/93/$03)
- Romer, G., Ayala, L., Chagas, F., & Silva, D. A. (2019). Estudio de Estabilidad de Taludes en Presas de Tierra en Condiciones No Saturadas Cuando Ocurre Descenso Rápido de Nivel de Agua. *Geotechnical Engineering in*

the XXI Century: Lessons Learned and Future Challenges, 1804–1814.

<https://doi.org/10.3233/STAL190237>

Salazar, F., Toledo, M. A., Oñate, E., & Morán, R. (2015). An empirical comparison of machine learning techniques for a dam behaviour modelling. *Structural Safety*, 59, 118.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.05.001>

Santillán, D., Fraile-Ardanuy, J., & Toledo, M. Á. (2014). Predicción de lecturas de aforos de filtraciones de presas bóveda mediante redes neuronales artificiales. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(3), 81–96. Available in:

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.doajarticles.987aeb382aafcb0ba932817dc676ed1&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Shahin, M. A. (2016). State-of-the-art review of some artificial intelligence applications in pile foundations. *Geoscience Frontiers*, 7, 33–34.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.10.002>

Singh, P., Bardhan, A., Han, F., Samui, P., & Zhang, W. (2023). A critical review of conventional and soft computing methods for slope stability analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(1), 1–17.

<https://doi.org/10.1007/s40808-022-01489-1>

Toapaxi, J., Hidalgo, X., Valencia, N., & Castro, M. (2015). Bases y Criterios para el Dimensionamiento Hidráulico de Formas Especiales de Saltos en Esquí en Presas. *Revista Politécnica*, 35(3), 1–6. Available in:

<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsair&AN=edsair.doajarticles.898fe082a53ba82ae7c3ec4762a8c503&lang=es&site=eds-live&scope=site>

Vahedifard, F., Jasim, F. H., Tracy, F. T., Abdollahi, M., Alborzi, A., & Aghakouchak, A. (2020). Levee Fragility Behavior under Projected Future Flooding in a Warming Climate. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(12), 1–12.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002399](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002399)

Wengang, Z., Hanlong, L., Wang, L., Xing, Z., & Yanmei, Z. (2023). *Application of Machine Learning in Slope Stability Assessment* (Springer (ed.)).

<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-99-2756-2>

Faculty of Civil. He has more than 12 publications and has participated in 8 events, both national and international. She is a reviewer for several national and international journals. She has published a monograph that has an ISBN.



González Haramboure, Yoermes Graduated in Hydraulic Engineering (2005) from the Technological University of Havana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Master in Civil Engineering (Geotechnics Specialty) (2010) and Doctor in Technical Sciences (Since 2014, Civil Specialty). He has been a Full

Professor since 2022. He has received the “Alma Mater” award, “Golden Chalk” and Distinction for Cuban Education, among others. He has 19 publications in referenced magazines and has participated in 20 events, both national and international. He is a reviewer in two international journals and has published 6 monographs that have ISBNs.



García Tristá, Jenny, Graduated in Civil Engineering (2006) at the Technological University of Havana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Doctor in Technical Sciences (2016, Civil Specialty). She has been a Full Professor since 2022. She has received the Forjadores Stamps of the Future Young Researcher award and the

distinction “For Cuban education” awarded by the Ministry of Higher Education (MES). He has more than 20 publications and has participated in 8 events, both national and international. She is a reviewer for several national and international journals.



Rosete Suárez, Alejandro, Graduated as an Engineer in Automated Management Systems (1993) at the Technological University of Havana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Master in Computer Science Applied to Engineering and Architecture (1995) and Doctor in Technical Sciences (2000,

Computer Science Specialty). He has received several awards, including three Awards from the Cuban Academy of Sciences, two Awards from the Ministry of Higher Education (MES), and three Special Distinctions from the MES, among others. President of the Permanent Court (Doctorates) of Automation and Computing from 2019 to 2022 and member of that court since 2005. Full Academician of the Cuban Academy of Sciences since 2018.

BIOGRAPHIES



Flores Berenguer, Isaida, Graduated in Civil Engineering (2016) at the Technological University of Havana “José Antonio Echeverría” (Cujae). Master in Civil Engineering (Communication Routes Specialty) (2020) and Aspiring for a Doctorate in Technical Sciences (Since 2022, Civil Specialty). She has been an Assistant Professor since 2022. She

has received the Young Researcher award awarded by the

Estabilización de Suelos Expansivos en Panamá con Mezclas de Residuos de Concha de Mar

Montenegro, Valery¹ ; Hernández, Delvis¹ ; Domínguez, Anmary¹ ; Vergara, Fidedigna² 
Arrocha, Jonatha² ; González-Valoys, Ana^{1,3*} 

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá, Panamá

²Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Experimental de Ingeniería, Panamá, Panamá

³Secretaría Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación de Panamá, Sistema Nacional de Investigación, Panamá, Panamá

Resumen: Los suelos expansivos son característicos de regiones tropicales, presentando grandes cambios volumétricos cuando su contenido de agua varía; estos cambios suelen presentar problemas estructurales en las cimentaciones provocados directamente por el comportamiento del material sobre el cual han sido construidas. Para controlar la expansión en suelos se emplean materiales cementantes, como el carbonato de calcio (CaCO_3), que es un mineral que se encuentra en muchas partes del planeta. Los exoesqueletos de animales marinos, residuos de actividades industriales como la pesca y la extracción de arena marina, que pudieran reutilizarse como una fuente rica en CaCO_3 . El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad para la estabilización de suelos expansivos en Panamá, a través de la compactación controlada y la adición de estabilizantes como la concha marina y el cemento, y así determinar la proporción óptima en el suelo expansivo del estudio, atendiendo al ODS 12 “Producción y consumo responsable”. Se caracterizó el suelo expansivo, la composición química del suelo y de la concha de mar, y se determinó el esfuerzo máximo a soportar a través del ensayo de la compresión no confinada del suelo expansivo con las adiciones realizadas, para determinar la mezcla y proporción óptima de estabilización. La mezcla de cemento/concha marina al 35 % obtuvo los mejores resultados, esto muestra viabilidad para el empleo de los residuos de concha marina como material cementante para la estabilización de suelos expansivos en Panamá.

Palabras clave: Conchas marinas, suelo expansivo, reutilización, estabilización, compresión no confinada del suelo

Stabilization of Expansive Soils in Panama with Seashell Residue Mixtures

Abstract: Expansive soils are characteristic of tropical regions, presenting great volumetric changes when their water content varies. These changes usually present structural problems in the foundations caused directly by the behavior of the material on which they have been built. Cementitious materials are used to control expansion in soils such as calcium carbonate (CaCO_3), that is mineral found in many parts of the planet. The exoskeletons of marine animals, waste of industrial activities such as fishing and the extraction of sea sand, that could be reused as a rich source of CaCO_3 . The objective of this study is to evaluate the feasibility for the stabilization of expansive soils in Panama, through controlled compaction and the addition of stabilizers such as seashell and cement, and thus determine the optimal proportion in the expansive land of the study, according to SDG 12 Responsible production and consumption. The expansive soil, the chemical composition of the soil and the seashell were characterized, and the maximum stress to be supported was determined through the unconfined compression test of the expansive soil with the additions made to determine the optimal mixture and proportion of stabilization. The 35 % cement/seashell mixture was obtained as the best results, this shows feasibility for the use of seashell waste as a cementing material for the stabilization of expansive soils in Panama.

Keywords: Seashells, expansive soil, reuse, stabilization, unconfined compression soil

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos son característicos de regiones tropicales, los cuales presentan grandes cambios volumétricos

cuando su contenido de agua varía (Delgado Trujillo, 1986); dichos cambios afectan a estructuras de poco peso que se encuentran apoyadas en cimentaciones superficiales. Sus efectos sobre las obras van desde levantamiento, rotura y daño

*ana.gonzalez1@utp.ac.pa
Recibido: 05/01/2024
Aceptado: 10/05/2024
Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/rp.vol54n1.05
CC 4.0

de pavimentos, edificaciones y revestimientos (Merchan Infante, 2009).

Panamá presenta suelos expansivos como lulita y limonita de forma predominante en regiones como: Veraguas, Panamá Oeste, Chiriquí y Herrera; con puntos incidentes en La Chorrera, Colón, Darién y Tierras Altas, zonas en que se han presentado problemas en estructuras como carreteras y edificaciones relacionados al comportamiento expansivo de los suelos y la estabilidad para la construcción (Molina, 2020).

Considerando que Panamá es un país de clima con estaciones húmedas que pueden llegar a generar un promedio de precipitación de 300 a 350 mm al mes (INEC, n.d.), la búsqueda de alternativas para el control de este tipo de suelos representa, una mejora a largo plazo de las edificaciones.

El CaCO_3 es un agente cementante natural utilizado ampliamente en la industria civil (Arango Campo, 2020). Las conchas marinas son una de las fuentes naturales más concentradas de este mineral alrededor del mundo, con concentraciones que rondan el 99 % de CaCO_3 y 1 % en una matriz orgánica (Rivera Pérez & Hernández Saavedra, 2020). La utilización de este tipo de mezcla data de la antigua Roma, donde se creó el famoso cemento puzolánico presente en los cementos Portland, con una aleación de ceniza volcánica, carbonato molido y agua de mar (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2014).

En Panamá, gran parte de la arena empleada en la construcción y mega obras, proviene de arena de mar. Las empresas en el proceso de extracción de arena generan grandes cantidades de residuos de concha de mar, que en conjunto con los residuos de la industria pesquera, podrían ser utilizados como fuente de CaCO_3 , y emplearse como aditivo estabilizante de suelos expansivos, entre otros usos ingenieriles, lo cual permitiría obtener beneficios económicos de este residuo, atendiendo al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 “Producción y consumo responsable”, que apunta a la reutilización de los residuos industriales como materia prima para otros procesos, en búsqueda de una economía circular.

El objetivo de este estudio es evaluar la viabilidad para la estabilización de suelos expansivos en Panamá, a través de la compactación controlada y la adición de estabilizantes como la concha marina y el cemento, para determinar la proporción óptima como estabilizante en el suelo expansivo del estudio, y brindar información que sea útil para formular estrategias que permitan el uso de la concha marina pulverizada con fines comerciales (Ruiz & Farfán, 2016).

Tomando en consideración a Anggraini et al. (2023), se busca realizar una mezcla de materiales que permita proporcionar más estabilidad a las estructuras, en este caso a través del agregado de conchas pulverizadas en distintas concentraciones, ya sea directamente al suelo o como aditivo al cemento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima

La muestra de suelo expansivo proviene de la región de Panamá, Darién, específicamente del área de Metetí. La muestra de residuos de concha marina proviene del proceso extractivo de arena de mar en Chame (ver Figura 1), mientras que el cemento empleado en los ensayos fue un cemento gris de uso general tipo (GU).



Figura 1. Residuos de concha de mar de Chame, Panamá

La selección del área para la extracción del suelo expansivo se basó en un muestreo deliberado, es decir, considerando los conocimientos de los pobladores sobre el comportamiento del suelo *in-situ*, en conjunto con la evaluación de las propiedades visuales perceptibles al momento, como rajaduras del suelo y de estructuras.

2.2 Pretratamiento de muestras

2.2.1 Suelos Expansivos

Se tomó una porción de suelo expansivo de aproximadamente 2.5 kg, este fue secado a temperatura ambiente y cuarteado, luego se disgregó la muestra con un mazo de goma. Una porción fue pasada por el tamiz N°10 (ver Figura 2), para trabajar con la fracción < 2 mm para el análisis del hidrómetro según la norma ASTM D7928-21e1 (2021). Otra porción fue pasada por el tamiz N. °4 para obtener la fracción < 4.76 mm para las pruebas de Proctor según la norma ASTM D698-12R21 (2021), y la resistencia no confinada a la compresión siguiendo la norma ASTM D2166/D2166M-16 (2016).



Figura 2. Tamizado de la fracción gruesa del suelo con el Tamiz N°10

2.2.2 Conchas Marinas

Para efectos de esta investigación, se utilizó el residuo de conchas marinas, sin lavar, secadas a 110°C por 24 h en el horno (Boxun BGZ). La pulverización se realizó a través del

ensayo de desgaste de los ángeles según la norma ASTM C535-16 (2016), la cual está destinada a agregados de gran tamaño. El material resultante del desgaste de los ángeles fue pasado por el tamiz N°12 para obtener la fracción < 1,7 mm para los ensayos de adición (Ver Figura 3).



Figura 3. Concha de mar pulverizada sin lavar

2.3 Análisis de laboratorio

2.3.1 Ensayo por hidrómetro

Se tomó 50 g de suelo natural y se humedeció con agua para posteriormente llevarlo a agitar en una batidora por un período de 1 minuto.

Según la norma ASTM C136/C136M-19 (2020), la mezcla suelo-agua se colocó en una probeta de 1000 mL, enrasándola con agua, y se realizaron lecturas intermitentes del hidrómetro y la temperatura del líquido, en un rango de 1 min a 24 horas.

2.3.2 Límites de Attenberg

2.3.2.1 Límite Líquido

Se realizaron tres mediciones distintas a través del método de Casagrande con medidas de masa del suelo húmeda (m_h) y masa del suelo seca (m_d), para determinar el porcentaje de humedad (% w). Para el mismo, se tomaron rangos de 30-35, 20-25 y 10-15, golpes en la copa Casagrande.

2.3.2.2 Límite Plástico

Se utilizaron 1000 g de suelo natural humedecido hasta un estado maleable y se compactó en forma de cilindros, los cuales se alargaron hasta su punto de ruptura, posteriormente se tomaron las medidas de masa húmeda y seca.

2.3.3 Pruebas de Expansión

Se tomó 300 g del suelo natural pasado por el Tamiz N°10, se colocó la muestra en un anillo de compresión (ver Figura 4) y se sometió a la presión del agua través de un cilindro de contención conocido como aparato Lambe, según la norma UNE 103600:1996 (2020) el ensayo de expansión se realizó con la humedad de la muestra en el límite plástico.

2.3.4 Análisis químico



Figura 4. Prueba de expansión del suelo de Metetí, Darién

Para cuantificar la presencia de compuestos químicos en todas las materias primas, se empleó la técnica de fluorescencia por rayos X (FRX), la cual arrojó los principales componentes en las distintas muestras en forma de porcentaje.

2.4 Métodos

2.4.1 Cálculo de resistencia a la compresión no confinada

En este ensayo, se tomaron medidas comparativas de la resistencia en kg/cm^2 de núcleos de ensayo de suelo natural, suelo natural con concha pulverizada, y suelo natural con cemento y concha pulverizada, en distintas proporciones.

El propósito de las mediciones radicó en determinar el esfuerzo máximo a soportar, lo que se logró a través del ensayo de la compresión no confinada (ver Figura 5), el cual cuantifica la capacidad resistente del suelo. Los exámenes de la resistencia no confinada del suelo en compresión se llevan a cabo a través de muestras cilíndricas, con una altura de 90 mm a 110 mm.

Las muestras con la dosificación de polvo de conchas marinas se prepararon mezclando completamente la cantidad deseada con el suelo expansivo, hasta obtener la humedad uniforme. La humedad y densidad óptimas se calcularon previamente, para la respectiva adición del agua.

Basado en la norma ASTM D2166/D2166M-16 (2016), se utilizó 1400 g de suelo natural humedecido con 240 ml de agua para las muestras de núcleo, las mediciones fueron tomadas en un rango de 13 lecturas, con valores de carga última en libras.

Al suelo expansivo se le realizaron adiciones del 10 % al 40 %, con incrementos del 5 %, de polvo de concha marina, otras con concha marina y cemento (en partes iguales), y cemento.



Figura 5. Prueba de compresión no confinada

3. RESULTADOS

3.1 Clasificación del suelo

Basados en las pruebas de laboratorio realizadas en el suelo, a través de los métodos de ensayo de granulometría por tamizaje e hidrómetro, se obtuvo un suelo con alto porcentaje de finos, siendo mayoritarios la arcilla con 54,8 % y el limo con 41,7 % (ver Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades físicas de la muestra de suelo expansivo

Propiedad	Valor
Gravedad específica	2,28
Distribución del tamaño de partícula (%)	
Grava	0,2
Arena	3,3
Limo	41,7
Arcilla	54,8
Límite Líquido	82
Límite Plástico	33
Índice Plástico	49
Humedad óptima (%)	29
Densidad máxima seca (kN/m ³)	12,48
Expansión en el aparato Lambe	10

De acuerdo con los resultados del ensayo de Límites de Atterberg, se pudo definir la muestra como una arcilla de alta plasticidad (CH), de color marrón oscuro (7.5 YR 3/3) según Munsell.

Además, se confirmó mediante la prueba de expansión el comportamiento expansivo de la arcilla con un valor muy crítico de 10, que se esperaba obtener para este suelo, de manera que se pudiesen realizar adiciones para mejorar la resistencia a la compresión no confinada

3.2 Composición química

En la Tabla 2, se observan los resultados de la composición química del suelo, la concha lavada y sin lavar, lo cual determina que la concha lavada presenta un mayor porcentaje de CaO (52,31 %) que la concha sin lavar (29,06 %), esto debido al alto contenido de impurezas proveniente de la arena extraída y que se refleja en el contenido de SiO₂ de (28,82 %); el suelo mostró valores altos de compuestos químicos representativos en suelos arcillosos como son Al₂O₃ (18,74 %), SiO₂ (45,11 %) y Fe₂O₃ (9,65 %).

Tabla 2. Composición química del suelo, concha marina lavada y concha marina sin lavar

Compuesto	Suelo (%)	Concha lavada (%)	Concha sin lavar (%)
SiO ₂	45,11	1,00	28,82
Al ₂ O ₃	18,74	0,04	7,70
Fe ₂ O ₃	9,65	0,54	3,32
CaO	0,70	52,31	29,06
MgO	1,09	0,30	0,83
SO ₃	0,02	0,30	0,54
Na ₂ O	0,14	< 0,01	1,45
K ₂ O	0,08	< 0,01	0,33
TiO ₂	0,94	0,03	0,34
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,07
Mn ₃ O ₄	< 0,01	0,01	0,02
Cr ₂ O ₃	0,03	< 0,01	< 0,01

3.3 Compresión no confinada de la muestra

Al aplicar las pruebas de compresión no confinada se obtuvo que los valores máximos para el criterio de capacidad de carga de las diferentes mezclas se dieron en las siguientes proporciones: suelo + cemento (10 %); suelo + cemento y concha sin lavar (35 %); suelo + concha sin lavar (35 %), nombradas respectivamente como S+10C, S+35CS y S+35S (Ver Tabla 3).

Se observó que la mezcla de S+35CS presenta una mayor capacidad de carga en comparación a las otras mezclas, siendo de 15,43 kg/cm² el máximo valor obtenido entre todos los ensayos realizados.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de compresión no confinada

Ensayo	Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	Peso unitario seco (kN/m ³)	Contenido de humedad (%)	Mejora con respecto al suelo natural (%)
Suelo	3,42	12,04	28,3	-
S+10C	4,37	13,25	24,3	27,8
S+35CS	15,43	16,75	20,1	351,2
S+35S	3,89	13,36	25,1	13,7

4. DISCUSIÓN

Para mejorar la capacidad de cementación en las mezclas se infiere que el uso de la concha pulverizada lavada sería lo óptimo, ya que en los análisis químicos realizados, presentó un

mayor porcentaje de CaO en comparación a la muestra de concha sin lavar.

Al adicionar un 35 % de concha pulverizada sin lavar a la muestra de suelo expansivo, se logró mejorar la capacidad de carga intrínseca del mismo en un 13,7 %; mientras que se dieron mejoras de hasta un 27,8 % en la mezcla de suelo al agregarle cemento al 10 %.

Además, tomando en cuenta los resultados presentados en la Figura 6 de esfuerzo de deformación, se puede inferir que la mezcla de S + 35CS tuvo el comportamiento óptimo entre todas las mezclas analizadas, 4,5 veces más el esfuerzo máximo del suelo expansivo seco. Esto se debe principalmente a la elevada presencia de CaO en la muestra, como resultado de la combinación de la concha pulverizada y el cemento.

pesquera. El reemplazo del uso de materiales como las calizas permite caminar a una nueva era de construcción sostenible sin la explotación de recursos limitados a través de un ciclo económico verde (Chilakala et al., 2019).

Considerando que los suelos expansivos predominan en Panamá, el uso de la concha marina pulverizada es una alternativa mucho más factible como estabilizador de expansión contrapuesto, al remplazo del suelo en su totalidad por suelos no expansivos, ya que no sólo disminuirá costos de transporte y mano de obra porque es un recurso de fácil acceso, sino que permitirá aumentar la resistencia a la compresión y la durabilidad del material.

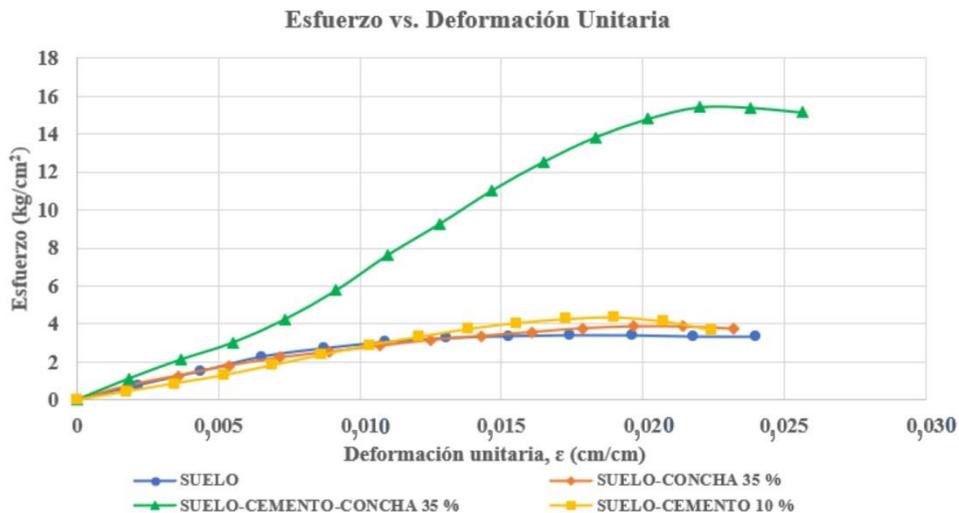


Figura 6. Gráfico de Esfuerzo vs. Deformación

Con base en los resultados de compresión no confinada, se puede inferir que la mejora con respecto al aumento de la capacidad de carga en los cilindros ensayados aumenta proporcionalmente con el porcentaje adicionado de concha marina pulverizada, lo que indica una posible neutralización de la expansión propia de este tipo de suelos.

Cabe destacar que el aumento de proporción de concha pulverizada posee un límite de efectividad en la mezcla y variará dependiendo de no solo las propiedades del suelo ensayado, sino de la composición química en lo que respecta al porcentaje de carbonato de calcio.

Es posible que la efectividad del concreto esté ligada a la presencia de aditivos externos, sin embargo, las propiedades intrínsecas del CaCO_3 propias de la concha como agente cementante contribuyen a la durabilidad de este y a la disminución del contenido de vacíos.

5. CONCLUSIÓN

Las conchas marinas son un recurso natural renovable que pasa desapercibido, el uso de éste como materia prima de carbonato de calcio en los suelos y cementos permite tener un nuevo enfoque en el uso de residuos de la industria arenosa y

Conforme en los resultados de compresión no confinada, se puede observar que la mezcla del 35 % de cemento junto con concha pulverizada sin lavar (en partes iguales) tuvo una capacidad de carga mucho mayor de 15,43 kg/cm² a comparación de la capacidad de soporte del suelo expansivo con cemento que fue de 4,37 kg/cm². Lo que supone una mejora a la capacidad máxima del suelo expansivo natural.

El agregado fino natural puede ser sustituido por conchas marinas trituradas hasta en un 35 % en peso para producir concreto ordinario estándar con la resistencia adecuada y densidad. Esto demuestra la viabilidad del estudio y su potencial de aplicación en el día a día de la industria estructural (Anggraini et al., 2023; Chilakala et al., 2019; Ruíz & Farfán, 2016; Vinod et al., 2020).

Para el entendimiento del comportamiento a futuro de esta mezcla, se recomienda la evaluación de todas las propiedades de este agregado como componente estabilizante en los suelos expansivos, el estudio de la cohesión, densidad conjunta y ensayos de capacidad de carga a escala. Además, se recomienda utilizar la concha lavada para aumentar el porcentaje de óxido de calcio, y con un secado a mayor temperatura, para aumentar la capacidad de cementación, y por lo tanto la capacidad de carga máxima.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Argos Panamá S.A por su colaboración con la realización de los ensayos químicos de las muestras de suelo y concha de mar; a la empresa Arenera Balboa por el suministro de residuos de concha de mar; al Laboratorio de Geotecnia del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), por su colaboración con los ensayos de geotecnia y al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) de Panamá por su respaldo a la investigación.

REFERENCIAS

- Anggraini, V., Dassanayake, S., Emmanuel, E., Yong, L., Kamaruddin, F., & Syamsir, A. (2023). Response Surface Methodology: The Improvement of Tropical Residual Soil Mechanical Properties Utilizing Calcined Seashell Powder and Treated Coir Fibre. *Sustainability*, 15(4), 3588. <https://doi.org/10.3390/su15043588>
- Arango Campo, S. E. (2020). *Mezcla puzolánica y cementante*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/d3/2c/6a/6e35abe309f83f/WO2020208552A1.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. (ASTM Standar No. C535-16).
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. (ASTM Standar No. D2166/D2166M-16).
- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. (ASTM Standar No. C136/C136M-19).
- American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. (ASTM Standar No. D698-12R21).
- American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. (ASTM Standar No. D7928-21e1).
- Chilakala, R., Thannaree, C., Shin, E. J., Thenepalli, T., & Ahn, J. (2019). Sustainable Solutions for Oyster Shell Waste Recycling in Thailand and the Philippines. *Recycling*, 4(3), 35. <https://doi.org/10.3390/recycling4030035>
- Delgado Trujillo, A. (1986). *Influencia de la trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno*. <https://idus.us.es/handle/11441/24350>
- INEC. (n.d.). *Precipitación pluvial registrada en las estaciones meteorológicas de la República, según provincia, comarca indígena y estación: años 2066-15*. <https://www.inec.gob.pa/archivos/P8211121-01.pdf>
- Merchan Infante, S. D. (2009). *Comportamiento de suelos expansivos en cimentaciones superficiales*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/11460>
- Molina, U. C. (22 de Noviembre de 2020). *MiAmbiente reconoce las causas que provocaron el desastre en Tierras Altas y preparan plan de prevención*. TVN Panamá. https://www.tvn-2.com/contenido-exclusivo/ministerio-ambiente-causas-desastre-tierras-altas-chiriqui-plan-prevencion_1_1052812.html
- Rivera Pérez, C., & Hernández Saavedra, N. Y. (2020). ¿Cómo se forma la concha de los moluscos? *Recursos Naturales y Sociedad*, 6(1), 43-54. https://www.cibnor.gob.mx/revistas/pdfs/vol6num1/4_COMO_FORMA.pdf
- Ruíz, G., & Farfán, P. (2016). *Use of crushed seashell by-products for sandy subgrade stabilization for pavement purpose*. 14th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Engineering Innovations for Global Sustainability". <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.053>
- Sanjuán Barbudo, M. Á., & Chinchón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. <https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/45347>
- Asociación Española de Normalización. (2020). *Determinación de la expansividad de un suelo en el aparato Lambe*. (UNE Estándar No. 103600:1996).
- Vinod, B. R., Shobha, R., Raghavendra, A. B., Rakesh, M., & Pallavi, S. (2020). Stabilization on Expansive soil using sea shell powder and Rubber powder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 814. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/814/1/012028/meta>

BIOGRAFÍAS



Valery, Montenegro, Estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. Interesada en el área de la investigación científica en distintas ramas de la ingeniería geológica como la hidrología, resistencia de los materiales y Geoquímica. Con experiencia en el proyecto de investigación de los pozos termales de Panamá. Experiencia en redacción de artículos científicos con contribuciones en el área de prospección geoquímica y geotécnica. Tiene una publicación científica en el área de Geoquímica en la revista I+D Tecnológico de la Universidad Tecnológica de Panamá.



Delvis, Hernández, Estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. Fue olímpico y finalista representante de la República de Panamá en las II Olimpiadas Centroamericanas y del Caribe de Biología, 2018. Trabajó en la División de Dragado del Canal de Panamá,

2019. Es investigador del Centro de Investigaciones Arqueológicas del Istmo Fundación El Caño, Panamá. Además, ha contribuido en una publicación científica en el área de geoquímica en la revista I+D Tecnológico de la Universidad Tecnológica de Panamá. Áreas de interés: geología, petrología, mineralogía y minería.



Anmary Domínguez, Estudiante de la carrera de Ingeniería Geológica de la Universidad Tecnológica de Panamá. Tiene un proyecto de investigación financiado por la SENACYT, titulado Estudio Hidrogeoquímico de la calidad de las aguas subterráneas para el consumo humano en San Juan de Dios, Pajonal y Caballero de

Coclé (Panamá). Es miembro del Grupo de Investigación Proyecto Geoparque Puente de las Américas. Participa del programa de Mentoría JULIA de la SENACYT. Tiene una publicación científica en la revista I+D Tecnológico de la Universidad Tecnológica de Panamá. Áreas de interés: Geoquímica, aguas subterráneas, Paleontología, Geología y Topografía.



Fidedigna, Vergara, es Licenciada en Tecnología con Especialización en Geología, e Investigadora del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). Ha participado en múltiples proyectos de investigación del área de Química Ambiental, Geofísica,

y Ciencias de los Materiales. Ha contribuido en la elaboración de publicaciones científicas en revistas de la UTP, y revistas indexadas en SCOPUS. Actualmente se desempeña como Subjefa del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales (LABAICA) de la UTP. Tiene amplia experiencia en el área física y química de agregados, cementos y suelos.



Jonatha, Arrocha, es Licenciado en Edificaciones. Técnico del Laboratorio de Geotecnia (LABGEO) del Centro Experimental de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). Tiene experiencia en perforaciones de pozos para investigación geotécnica, ensayos de campo y laboratorio

de mecánica de suelos y mecánica de rocas. Ha contribuido en la elaboración de publicaciones científicas en revistas indexadas en SCOPUS. Es Investigador de Proyectos de Investigación financiados por la SENACYT, y asesor de proyectos de Geotecnia a estudiantes de la UTP.



Ana González Valoys, Doctora en Química Agrícola. Docente e Investigador en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá. Es Investigador Principal de Proyectos financiados por la SENACYT, colabora en Proyectos Internacionales. Investigador del Sistema Nacional de

Investigación (SNI) de Panamá. Investigador Asociado del Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología (CEMCIT-AIP). Miembro del Grupo de Investigación Proyecto Geoparque Puente de las Américas. Autor de publicaciones científicas en SCOPUS. Contribuye a la formación de nuevos investigadores guiando a sus estudiantes y a colaboradores. Líneas de Investigación: Geoquímica Aplicada, Hidrogeoquímica, Química Ambiental, Geotecnia.

Diseño e Implementación de un Prototipo Portable de Generación Piezoeléctrica

Portilla, Miguel ¹; Ludeña, Raúl ¹; Asanza, Víctor ^{2*}; Dávila, Miguel ¹; Nevarez, Manuel ¹

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Esmeraldas PUCESE, Programa de Maestría en Electricidad, Esmeraldas, Ecuador

²SDAS Research Group, Ben Guerir 43150, Morocco

Resumen: Este documento presenta una investigación sobre el diseño y evaluación de un sistema de recolección de energía piezoeléctrica utilizando una alfombra con múltiples elementos piezoeléctricos. La investigación inicia con una introducción sobre la importancia de desarrollar fuentes alternativas de energía renovable para dispositivos electrónicos portátiles. Posteriormente, se presenta una revisión de literatura sobre tecnologías de recolección de energía del movimiento humano, enfocándose en materiales piezoeléctricos. La metodología describe el diseño de un prototipo de alfombra piezoeléctrica compuesta por una capa de goma, una lámina de acrílico y múltiples elementos piezoeléctricos conectados en paralelo a un circuito recolector de energía. Se realizaron pruebas para caracterizar la respuesta de los sensores piezoeléctricos y evaluar el sistema de recolección de energía bajo diferentes configuraciones. Los resultados indican que un solo elemento generó 18,59 μJ , mientras que 10 elementos conectados produjeron 297,4 μJ con un voltaje de 0,57 V. Además, el sistema permite la adquisición remota de datos a través de la plataforma IoT Thingspeak.

Palabras clave: Energía renovable; Recolección de energía; Movimiento humano; Alfombra piezoeléctrica; IoT

Design and Implementation of a Portable Piezoelectric Power Generation Prototype

Abstract: This document presents a research on the design and evaluation of a piezoelectric energy harvesting system using a mat with multiple piezoelectric elements. The research begins with an introduction on the importance of developing alternative sources of renewable energy for portable electronic devices. Subsequently, a literature review on human motion energy harvesting technologies is presented, with a focus on piezoelectric materials. The methodology describes the design of a piezoelectric mat prototype consisting of a rubber layer, an acrylic sheet, and multiple piezoelectric elements connected in parallel to an energy harvesting circuit. Tests were conducted to characterize the response of the piezoelectric sensors and evaluate the energy harvesting system under different configurations. The results indicate that a single element generated 18,59 μJ , while 10 connected elements produced 297,4 μJ with a voltage of 0,57 V. Furthermore, the system enables remote data acquisition through the IoT platform Thingspeak.

Keywords: Enewable energy; Energy harvesting; Human movement; Piezoelectric mat; IoT

1. INTRODUCCIÓN

El uso y abuso ilimitado de recursos energéticos finitos como el carbón, los hidrocarburos y el gas natural, tanto en hogares como en grandes industrias, están teniendo un impacto negativo en los ciclos vitales del planeta como el ciclo del agua. Esto conduce a fenómenos como lluvias ácidas, desertificación, sequías, contaminación de ríos y océanos, y la degradación de la capa de ozono (Abdal & Leong, 2019).

Sin embargo, estos no son los únicos problemas energéticos actuales. Aunque los hidrocarburos han sido la principal fuente de energía, se ha demostrado que no son infinitos y su uso excesivo está dañando el medio ambiente a escala global. Por lo tanto, el sistema energético actual no es sostenible y varias naciones buscan cambiar su matriz energética a fuentes limpias para lograr mayor eficiencia energética mediante alternativas renovables (Niasar et al., 2020).

*victor.asanza@sdas-group.com

Recibido: 23/11/2023

Aceptado: 19/07/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.06

CC 4.0

Existen métodos para minimizar los efectos de la actividad humana sobre el medio ambiente. En este contexto, las fuentes de energía limpia emergen como una alternativa importante. Estas fuentes se producen de manera constante y no se agotan a una escala significativa para los seres humanos. Se originan a partir de fenómenos naturales que no alteran el equilibrio de la Tierra, no generan residuos y su tasa de consumo es menor que la velocidad de regeneración de los recursos utilizados (Huang et al., 2022).

Las fuentes renovables de energía sobresalen debido a que son inagotables, renovables y no contaminantes. Además, según algunos estudios (Vizzari et al., 2021), el uso a largo plazo de energías renovables conserva la vida humana al tiempo que promueve sociedades más sostenibles y equitativas.

Con el rápido desarrollo de la microelectrónica, los dispositivos electrónicos inteligentes, se ha minimizado el uso de fuentes de energía externas, como baterías (Fan et al., 2016). No obstante, existe un interés considerable para mejorar el almacenamiento de la batería, ya que los sistemas antes descritos aún requieren una carga regular y un proceso de reemplazo que reduce significativamente sus aplicaciones (Song et al., 2019). Por lo tanto, para alimentar aparatos electrónicos de baja potencia se necesita un suministro de energía constante y sostenible. La solución más factible es extraer energía del medio ambiente y transformarla en electricidad (Wang et al., 2018).

El estudio presentado por Owusu & Asumadu-Sarkodie (2016) menciona a la energía solar y eólica como fuentes de energía renovable y limpia. Sin embargo, estas no proporcionan energía constante debido a su dependencia de las condiciones climáticas. Por el contrario, el movimiento humano está presente en todas partes, exhibiendo un gran potencial para generar energía biomecánica ilimitada, limpia y sostenible para la electrónica inteligente (Xie & Cai, 2014).

Los movimientos biomecánicos humanos, como el movimiento de los dedos, caminar, correr, escribir a máquina e incluso los desplazamientos diminutos dentro del cuerpo humano, como el movimiento de los pulmones, los latidos del corazón y la contracción muscular, poseen una cantidad abundante de energía residual que se puede aprovechar (Roundy & Trolrier-McKinstry, 2018). Pequeños desplazamientos como el movimiento de las extremidades inferiores, como el balanceo de las piernas, puede generar la máxima potencia debido a sus pares más altos que los movimientos de otras partes del cuerpo (Fan et al., 2017). Sin embargo, aprovechar la energía del movimiento humano es bastante complejo y desafiante debido a los movimientos multidimensionales y la frecuencia ultra baja del movimiento humano (Kim et al., 2018).

Bajo este contexto, se necesitan tecnologías de recolección de energía que puedan recopilar de manera efectiva el potencial del movimiento humano. El progreso en el desarrollo de dispositivos electrónicos portátiles autoalimentados depende considerablemente del rendimiento de las tecnologías de recolección de energía (Alhawari et al., 2018). Actualmente,

las tecnologías más comunes para recolectar energía biomecánica del movimiento humano son el Piezoeléctrico, el electromagnético y el triboeléctrico, respectivamente (Lin et al., 2017; Moure et al., 2016; Saha et al., 2008).

Los materiales piezoeléctricos funcionan según el principio del efecto piezoeléctrico, es decir, la propiedad del material para generar electricidad tras la deformación mecánica (Kang et al., 2016). Estos materiales generalmente caen en los modos de trabajo transversal, longitudinal y piezotrónico (Narita & Fox, 2018). Varios investigadores han utilizado estos modos de trabajo para recolectar energía del movimiento humano *in vitro* e *in vivo* para alimentar dispositivos portátiles inteligentes como zapatos inteligentes, textiles inteligentes, dispositivos implantables y dispositivos de monitoreo biomédico (Zhang et al., 2019). Del mismo modo, los materiales electromagnéticos basados en la captación de energía del movimiento humano son bien conocidos por su mayor potencia de salida. Los dispositivos de captación de energía electromagnética funcionan según la ley de inducción electromagnética de Faraday, por lo tanto, la propiedad del material de inducir corriente eléctrica cuando atraviesa el campo magnético (Zhang et al., 2019).

Dependiendo de su mecanismo, los materiales piezoeléctricos se pueden clasificar en recolectores de energía rotativos, oscilatorios e híbridos (Dinulovic et al., 2015). Los colectores rotativos suelen utilizar un tren de engranajes y turbinas debido a sus requisitos de alta potencia (Niroomand & Foroughi, 2016). Los recolectores oscilatorios usan el sistema masa-resorte-amortiguador que generalmente funciona en excitaciones de baja frecuencia con salidas de baja potencia, y los recolectores electromagnéticos híbridos usan rotores excéntricos para acoplar la energía cinética producida por el movimiento humano (Wu et al., 2018).

En el contexto de dispositivos electrónicos portátiles autoalimentados, los recolectores de energía electromagnética que aprovechan el movimiento humano, suelen tener dimensiones más amplias y carecer de diseños miniaturizados. Como resultado, a menudo se combinan con otros materiales, como materiales piezoeléctricos y triboeléctricos, para su integración en la electrónica portátil (Quan et al., 2015). Finalmente, la tecnología más reciente y avanzada para el aprovechamiento de energía del movimiento humano es la recopilación de energía triboeléctrica, que opera en el conocido fenómeno llamado triboelectrificación en el que los materiales se cargan eléctricamente al contacto por fricción (Wang et al., 2015). El desplazamiento relativo entre materiales cargados eléctricamente da como resultado la generación de electricidad. Se han propuesto cuatro tipos de modos de trabajo, en función del tipo de movimiento relativo entre los dos materiales triboeléctricos y la posición del electrodo (Randriantsoa et al., 2023).

Los materiales piezoeléctricos, parte de la categoría más amplia de ferroeléctricos, poseen una característica distintiva: su estructura molecular permite la existencia de dipolos eléctricos locales (Zhao & You, 2014). Estos materiales tienen la capacidad de convertir el estrés mecánico en carga eléctrica -efecto piezoeléctrico directo- y viceversa -efecto

piezoeléctrico inverso- (Cao et al., 2019). Trascendentales en la generación de energía de forma sostenible, especialmente mediante la utilización de cerámicas piezoeléctricas. Sin embargo, el almacenamiento de energía convertida es un desafío significativo (Wen & Xu, 2018). Aunque se puede utilizar directamente, la energía generada por un dispositivo piezoeléctrico no resonante, que no produce una señal constante, debe almacenarse, generalmente, en una batería. En este sentido, los captadores de energía que aprovechan las fuentes de energía mecánicas y vibratorias, incluyendo el movimiento humano, presentan un futuro prometedor para la creación de sistemas energéticos autoalimentados en diversos entornos, que incluyen el cuerpo humano (Qian et al., 2018).

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal desarrollar un dispositivo que no solo sea funcional y eficiente en la conversión de energía, sino también fácilmente transportable y económico, satisfaciendo así las necesidades y demandas de un público más amplio. Para lo cual, se emplea una metodología secuencial que permite el diseño tanto a nivel de hardware y software de la alfombra piezoeléctrica compuesta por una capa de goma, una lámina de acrílico y múltiples elementos piezoeléctricos conectados en paralelo a un circuito recolector de energía. Posteriormente, se realizaron pruebas para caracterizar la respuesta de los sensores piezoeléctricos y evaluar el sistema de recolección de energía bajo diferentes configuraciones. Donde se obtuvo, que un solo elemento generó 18,59 μJ , mientras que 10 elementos conectados produjeron 297,4 μJ con un voltaje de 0,57 V.

El artículo se encuentra estructurado en cuatro secciones distintas. En la segunda sección, se describen los trabajos relacionados, mientras que la tercera sección presenta la metodología empleada en la investigación. En la cuarta sección, se exponen los resultados de las predicciones realizadas, acompañados de su correspondiente análisis. Finalmente, dentro de la sección 5 se abordan las discusiones y conclusiones del artículo.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen varios estudios que abordan el problema desde diferentes perspectivas, por ejemplo, Ali et al. (2023) revisan los avances recientes en materiales piezoeléctricos biodegradables, incluidos los polímeros naturales y sintéticos, sus principios, aplicaciones avanzadas y retos para usos médicos. El artículo destaca la evolución de los materiales convencionales no reciclables a materiales funcionales, biodegradables, ecológicos y biocompatibles. También se analiza los métodos de degradación de estos materiales piezoeléctricos mediante estudios *in vitro* e *in vivo*. El artículo concluye que estas mejoras en los materiales piezoeléctricos biodegradables y los microsistemas podrían permitir nuevas aplicaciones en el campo biomédico, como la detección de señales fisiológicas, el diagnóstico de problemas médicos, la apertura de la barrera hematoencefálica y la estimulación de la cicatrización o el crecimiento de tejidos.

Por otro lado, Raj & Ranganathan (2021) abordan el análisis comparativo de distintos modelos de soluciones de captación

de energía piezoeléctrica. Los autores destacan la importancia de las soluciones de captación de energía piezoeléctrica en el desarrollo de redes de sensores inalámbricas autoalimentadas. Además, el estudio compara diferentes modelos para soluciones de captación de energía piezoeléctrica, incluyendo modelos analíticos, modelos numéricos y modelos experimentales. Asimismo, se discute las ventajas y desventajas de cada modelo y proporciona un análisis detallado de su rendimiento. La conclusión de este estudio dicta que la selección del modelo apropiado para las soluciones de captación de energía piezoeléctrica depende de la aplicación específica y del nivel de precisión deseado. Por lo que, los autores sugieren que la investigación futura debería centrarse en el desarrollo de modelos más precisos y eficientes para las soluciones de captación de energía piezoeléctrica con el fin de mejorar su rendimiento y fiabilidad.

Chen et al. (2020) exploran la posibilidad de utilizar materiales piezoeléctricos para recolectar energía de las vibraciones generadas por el viento. Este trabajo también examina la factibilidad de emplear la energía obtenida mediante piezoelectricidad para alimentar nodos de sensores inalámbricos. La investigación revela las conclusiones de experimentos realizados con el fin de establecer la configuración más eficiente de los transductores piezoeléctricos para la recolección de energía. Los autores del estudio tratan también los desafíos que se presentan en el diseño de sistemas de recolección de energía, como la necesidad de una administración eficaz de la potencia y el almacenamiento de energía. En última instancia, se concluye que la recolección de energía mediante piezoelectricidad puede ser una tecnología con gran potencial para alimentar nodos de sensores inalámbricos, si bien se requieren más investigaciones para optimizar el rendimiento de estos sistemas.

Qian et al. (2019) exploran el uso de la hebilla de correa amplificada mecánicamente para una mochila utilizando un actuador piezoeléctrico apilado para la extracción de energía, y se logra una potencia de salida máxima de 0,4 mW.

Guido et al. (2016) abordan la captación de energía biocompatible de los movimientos humanos mediante el apilamiento de películas delgadas de nitrato de aluminio con un voltaje pico de 0,7 V y una potencia eléctrica de 0,2 μW . Asimismo, Kim et al. (2018) realizan la mejora de un recolector de energía flexible para fuerzas de entrada multidireccionales, fabricado con películas de PDMS y PVDF con un pico de tensión de salida generado de 1,75 V.

Zhao & You (2014) recomiendan el uso de una multicapa de PVDF para diseñar PEH a partir de energía mecánica en zapatos, la cual se origina por el movimiento humano con una potencia de salida de 1 mW. De forma similar, Cao et al. (2019) desarrollan un colector insertado en el zapato con un diseño estructural en zigzag compuesto por dos capas de acero inoxidable y una película de PVDF. Este diseño se implementó en un humano corriendo en una cinta a 6 km/h, lo cual produjo un pico de tensión de salida de 5,032 V.

Wen & Xu (2018) diseñan un recolector de energía para los pasos humanos durante la marcha basado en el mecanismo de amplificación de fuerza, con el fin de amplificar la fuerza aplicada en la pila piezoeléctrica y se examina la alta potencia de salida en comparación con los diseños existentes.

Qian et al. (2018) utilizan un mecanismo de amplificación de fuerza y se fabrica un colector de energía para el calzado. Este consiste en varias pilas piezoeléctricas y dos placas de aluminio para caminar a diferentes velocidades. En consecuencia, se obtiene una potencia máxima de salida de 28 mW. Del mismo modo, se han realizado diferentes estudios sobre el mecanismo de amplificación de la fuerza con el fin de maximizar la potencia de salida en los dispositivos de recolección de energía piezoeléctrica.

Asimismo, en el proyecto presentado en (Guido et al., 2016), se informa de la captación de energía biocompatible de los movimientos humanos mediante el apilamiento de películas delgadas de nitruro de aluminio con un voltaje pico de 0,7 V y una potencia eléctrica de 0,2 uW.

Del mismo modo, Kim et al. (2018) realizan la mejora de un recolector de energía flexible para fuerzas de entrada multidireccionales, fabricado con películas de Polidimetilsiloxano (PDMS, por sus siglas en inglés) y Polifluoruro de vinilideno (PVDF, por sus siglas en inglés) con un pico de tensión de salida generado de 1,75 V. En 2014, Zhao & You recomiendan el uso de una multicapa de PVDF para diseñar PEH a partir de energía mecánica en zapatos, la cual se origina por el movimiento humano con una potencia de salida de 1 mW. De forma similar, Cao et al. (2019) desarrollan un colector insertado en el zapato con un diseño estructural en zigzag compuesto por dos capas de acero inoxidable y una película de PVDF. Este diseño se implementó en un humano corriendo en una cinta a 6 km/h, produciendo un pico de tensión de salida de 5,032 V.

Qian et al. (2018) utilizan el mismo mecanismo de amplificación de fuerza que el mostrado en la Figura 2, y se fabrica un colector de energía para el calzado. Este consiste en varias pilas piezoeléctricas y dos placas de aluminio para caminar a diferentes velocidades. En consecuencia, se obtiene una potencia máxima de salida de 28 mW. Del mismo modo, se han realizado diferentes estudios sobre el mecanismo de amplificación de la fuerza con el fin de maximizar la potencia de salida en los dispositivos de recolección de energía piezoeléctrica (Qian et al., 2018).

A pesar de los avances significativos en diversos campos de la tecnología, se ha observado que muchas de estas innovaciones aún presentan desafíos en términos de portabilidad y costos accesibles. Estos factores se han convertido en obstáculos significativos para su adopción generalizada y utilización eficaz. Sin embargo, la tecnología piezoeléctrica se destaca por su excepcional portabilidad y asequibilidad, lo que la convierte en una opción atractiva para numerosas aplicaciones. Esta ventaja distintiva ha motivado un enfoque particular en el diseño e implementación de un prototipo de generación piezoeléctrica portátil en el marco de la presente investigación.

3. METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA

Para el desarrollo de un sistema de recolección de energía, se ideó un prototipo detallado cuya representación se puede observar en la Figura 1.

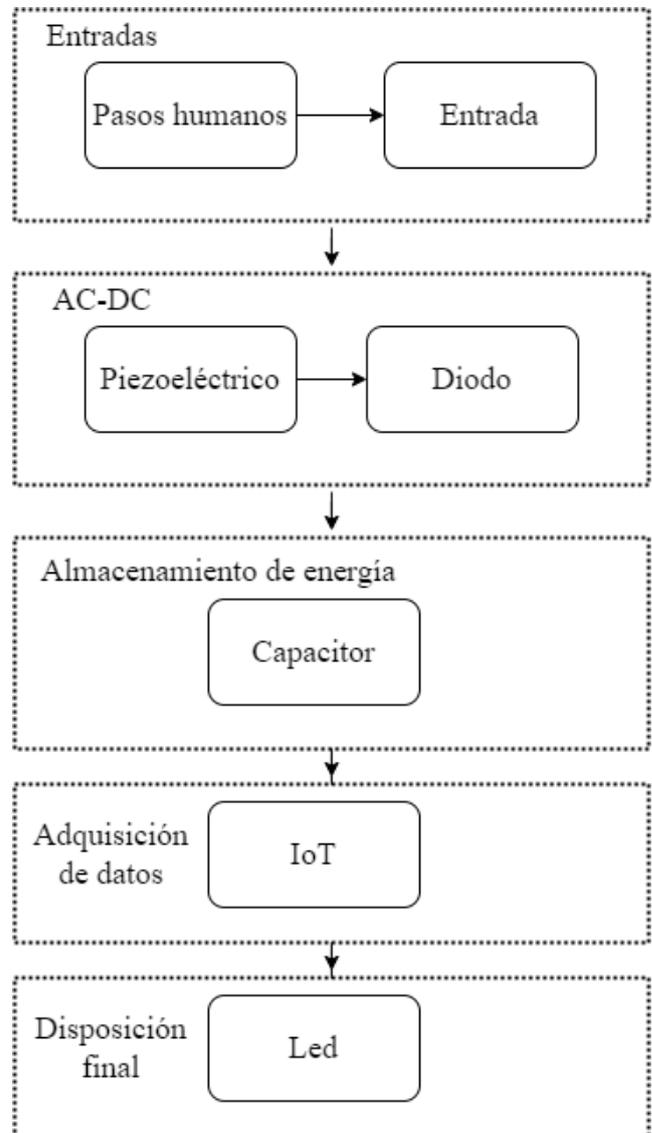


Figura 1. Proceso de conversión de energía

3.1 Diseño del Hardware

Para el desarrollo del prototipo se consideraron cinco etapas. La primera involucra la generación de energía mecánica a través de los pasos humanos en la alfombra piezoeléctrica. En la segunda etapa, los sensores piezoeléctricos incorporados en la alfombra capturan la energía, que luego se rectifica de CA a CC para obtener una señal continua en la tercera etapa. Esta energía se almacena en una batería en la cuarta etapa y se monitorean las variables eléctricas, como voltaje y corriente, mediante una placa de desarrollo con conexión wifi (ESP8266) y una plataforma de IoT (ThingSpeak). Finalmente, la quinta etapa involucra la gestión de los datos y el uso o almacenamiento adecuado de la energía recolectada, como se ilustra en la Figura 1.

Un componente esencial en este diseño es un mosaico compuesto, cuya estructura se detalla en la Figura 2. Este mosaico incorpora una capa de goma, acrílico y transductores piezoeléctricos, cada uno de los cuales desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del sistema de recolección de energía. Se optó por un tamaño estándar de 30 cm x 30 cm para el mosaico, garantizando así su compatibilidad y facilidad de instalación en diversos entornos. Cada elemento del mosaico fue cuidadosamente seleccionado y dispuesto para maximizar su eficiencia en la conversión de energía mecánica en eléctrica.

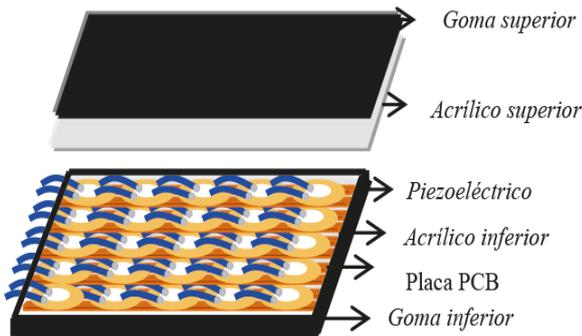


Figura 2. Esquemático de alfombra piezoeléctrica

La conexión de los transductores piezoeléctricos representa otro aspecto crucial del diseño. Estos elementos se conectan tanto en paralelo como en serie a las Placas de Circuito Impreso (PCB, por sus siglas en inglés) que rodean el azulejo. La disposición de estos elementos responde a la necesidad de optimizar la recolección y el flujo de energía. Además, al encontrarse los transductores en serie y en paralelo, contribuye a la eficacia del sistema, permitiendo una recolección de energía más uniforme y eficiente. En última instancia, este diseño detallado y considerado pretende aprovechar al máximo el potencial de los materiales piezoeléctricos en la recolección de energía.

La expresión para la tensión de salida generada por un transductor piezoeléctrico de tipo disco se encuentra definida en la Ecuación 1.

$$V = \frac{g33lF}{\pi r^2} \tag{1}$$

La Ecuación 1 se expresa de la siguiente manera: V representa la tensión de salida en voltios, donde l es la altura o espesor del material piezoeléctrico en metros, F es la fuerza aplicada en newtons, $g33$ es la constante piezoeléctrica de voltaje en voltios por newton, A es la superficie del elemento cerámico en metros cuadrados, r es el radio del disco o varilla cerámica en metros, y π es la constante phi, que se aproxima a 3,14.

Por otro lado, la tensión de salida piezoeléctrica, que puede tener polaridad positiva o negativa, podría clasificarse como un sistema de corriente alterna. Para lo cual, se utiliza un diodo puente que ajusta la salida de cada piezoeléctrico y permite que no se interfieran entre sí. El circuito recolector

de energía se conforma por diez elementos piezoeléctricos conectados en paralelo para obtener una corriente mayor con un nivel de tensión igual para cada elemento. Se empleó un diodo puente KBP308 para la conexión de cada dispositivo, tal como se muestra en el esquema del circuito de la Figura 3.

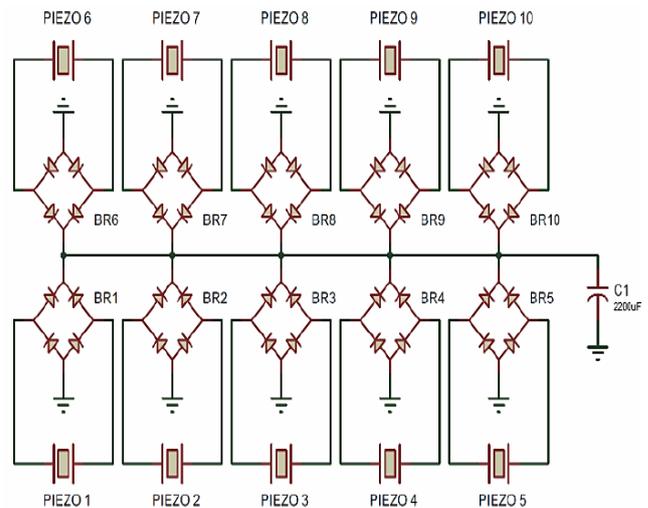


Figura 3. Diagrama electrónico de alfombra piezoeléctrica

En la Figura 4, se observa la disposición de cada piezoeléctrico (Cuadrado negro) con la conexión a su respectivo elemento rectificador (KBP308). Existe un total de 10 piezoeléctricos conectados en paralelo a un condensador que está representado por una bornera de dos tornillos.

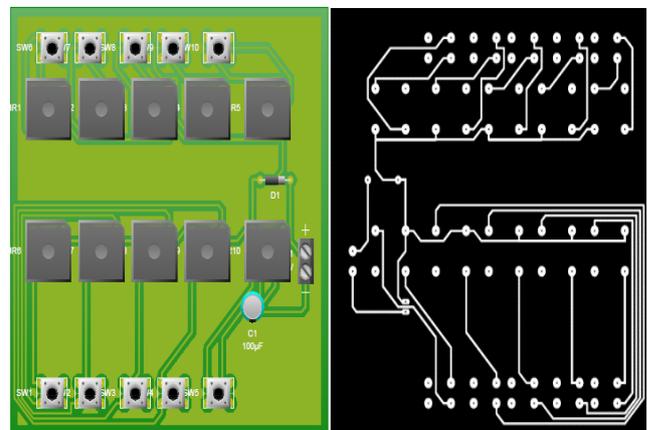


Figura 4. Placa PCB de alfombra piezoeléctrica

Durante la prueba de funcionamiento inicial de la alfombra piezoeléctrica, se pone de manifiesto el Estado de carga (SoC, por sus siglas en inglés) de la batería se comporta de forma ascendente casi lineal mientras haya afluencia de personas que ejerzan tensión mecánica sobre la alfombrilla. Por el contrario, cuando se desconecta la carga, el SoC disminuye gradualmente de forma casi lineal, como se observa en la Figura 5.

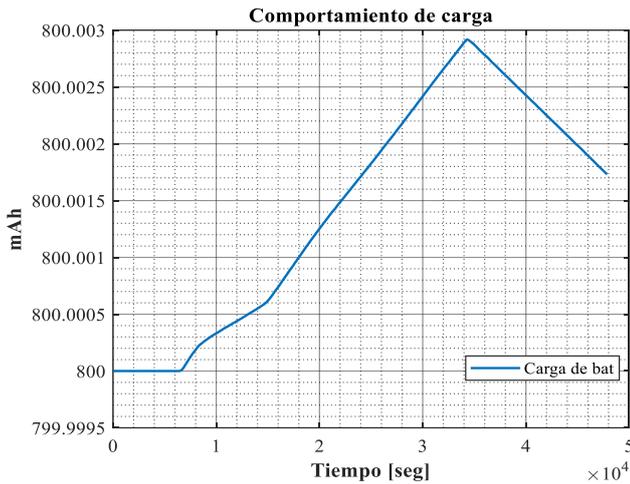


Figura 5. Prueba de comportamiento de carga de la batería

3.2 Sistema de Adquisición de datos

Se utilizaron herramientas electrónicas y de conectividad a Internet para adquirir las mediciones de la alfombra piezoeléctrica. El dispositivo empleado en este proceso está compuesto por varios componentes clave, que incluyen un módulo Node MCU ESP 8266, un sensor de voltaje INA 219 y un display IC2 16X2, como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Características técnicas de circuito de adquisición de datos

Componente	Voltaje de Operación	Corriente de Operación	Forma de comunicación
Generador Piezoeléctrico	1,2 – 5 V	Varía según modelo	Análogo
INA 219	3,3V o 5 V	Varía según aplicación	Análogo
I2C 16X2	5 V	Varía según uso	Serial

La adquisición de datos de voltaje y corriente se lleva a cabo mediante la codificación de un sistema que involucra el sensor INA 219 y la placa de desarrollo Node MCU ESP 8266. En este proceso, la placa se configura con credenciales de red específicas, incluyendo Identificación de Conjunto de Servicios (SSID, por sus siglas en inglés) y contraseña, para permitir la transferencia de los datos recopilados a la plataforma ThingSpeak. El diagrama de este procedimiento se encuentra detallado en el algoritmo 1 (Figura 6). Además, los datos obtenidos de las pruebas de experimentación se pueden acceder mediante el siguiente enlace: <https://thingspeak.com/channels/2285032>.

El Algoritmo 1 describe el procedimiento lógico secuencial para realizar la adquisición de datos provenientes desde la alfombra piezoeléctrica. Una vez obtenidos los datos, se realiza la conexión de la placa de desarrollo NODE MCU ESP 8266 mediante la ID y la API KEY del canal de ThingSpeak. De manera posterior, mediante el sensor INA 2019 se recopila el voltaje y la corriente. En este sentido, el voltaje se multiplica por un factor de ajuste para obtener una buena precisión. Este factor viene dado por el fabricante del sensor. Los datos se recopilan cada 2 ms y se envían a la plataforma IoT de Thing Speak.

Algorithm 1: Pseudocódigo de adquisición de datos con Node MCU ESP8266

```

Result: Voltaje;
Corriente;
Inicio;
Serial.begin(115200);
WiFi-mode = (WIFI STA);
ThingSpeak.begin(client);
while Data Frame do
  busvoltage = ina219.getBusVoltage-V();
  int-busvoltage = busvoltage * 1000;
  current-mA = ina219.getCurrent-mA();
  if measure V == true then
    ThingSpeak.writeField(Channel-ID, Field number, busvoltage, WriteAPIKey);
  else
    measure-V = false;
  end
end
end

```

Figura 6. Algoritmo para la adquisición de datos con Node MCU ESP8266

4. RESULTADOS

Luego de diseñar el prototipo de la alfombra piezoeléctrica, se realizaron diversas pruebas de rendimiento en conjunto con la plataforma de Medición de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) ThingSpeak. Este análisis se enfocó en dos áreas principales: en primer lugar, se examinaron los resultados de las mediciones de las propiedades del voltaje de salida del material piezoeléctrico; en segundo lugar, se evaluaron los resultados del sistema de recolección de energía. A través de la evaluación de estas métricas clave, se busca obtener una caracterización completa de las capacidades y las posibles aplicaciones de la alfombra piezoeléctrica para la recolección de energía.

4.1 Mediciones de las características de la tensión de salida piezoeléctrica

Los resultados obtenidos en estas mediciones muestran un voltaje mínimo de 0,1 V y un máximo de 2,8 V luego de efectuar pruebas con 10 muestras, el voltaje se generaba cuando el piezoeléctrico estaba sometido a una carga y desaparecía o llegaba a cero en ausencia de cambios de presión en el mismo, lo que se puede clasificar como un impulso. Sin embargo, los resultados de las pruebas con diferentes pesos mostraron una inconsistencia en el voltaje de salida para un elemento en particular. La alfombra piezoeléctrica de 30 x 30 cm, como se muestra en la Figura 7, fue empleada para ajustar la trayectoria de caída sobre el piezoeléctrico, la cual no logró asegurar una respuesta piezoeléctrica consistente.

$$I = F \Delta_t \quad (2)$$

$$I = mg \Delta_t \quad (3)$$

$$I = 70 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 1\text{s} \quad (4)$$

$$I = 686 \text{ kg} * \text{m/s} \quad (5)$$

La Ecuación 2 indica que el impulso (I) es igual a la fuerza (F) por el cambio en el tiempo (Δt). Es decir, la corriente generada es proporcional a la fuerza aplicada y al tiempo en que se aplica dicha fuerza. Por otro lado, la Ecuación 3 especifica que la fuerza (F) es equivalente a la masa (m) por la aceleración gravitacional (g). Por lo tanto, la corriente es

proporcional a la masa que ejerce la fuerza y al intervalo de tiempo.



Figura 7. Piezoeléctricos dispuestos sobre azulejo (Izquierda). Vista superior de alfombra piezoeléctrica (Derecha)

La respuesta del impulso piezoeléctrico, según la Ecuación 2, se ve influenciada por la magnitud de la fuerza aplicada y la duración del intervalo de tiempo durante el cual se ejerce la fuerza. En caso de que la fuerza sea mayor y el intervalo de tiempo sea más extenso, el impulso generado será más significativo. Esto se ejemplifica en la Figura 8, que representa el ángulo de caída del peso sobre la superficie de la alfombra. En este contexto, la Figura 8(a) muestra una superficie plana, mientras que la Figura 8(b) representa una superficie inclinada.

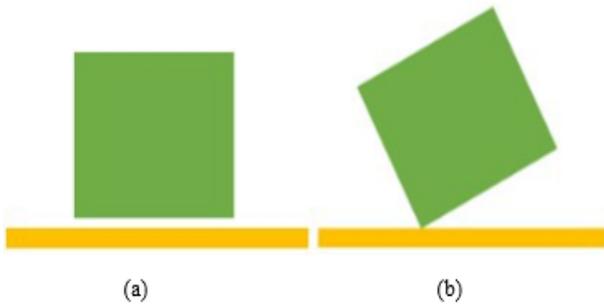


Figura 8. La carga de peso sobre la superficie de la alfombra: (a) superficie plana y (b) superficie angular

$$p = F/A \tag{6}$$

De acuerdo con la Ecuación (6), las variaciones en el ángulo o en la configuración superficial de un objeto en relación con la fuerza ejercida tendrán un impacto en la presión que se transmite a la superficie de otro objeto. La relación entre la fuerza (F) con el área de la sección transversal o superficie (A) es inversamente proporcional. Cuanto mayor sea la sección transversal o la superficie afectada por la presión, menor será la fuerza generada. Por el contrario, cuanto más estrecha sea la sección transversal, mayor será la fuerza generada. Por lo tanto, existe una correlación entre el ángulo de caída del peso y la respuesta de la tensión piezoeléctrica. Cuando el peso cae precisamente en un ángulo de 90 grados perpendiculares a la superficie de la alfombra, como se muestra en la Figura 8(a), el periodo es más prolongado que cuando las pesas caen y forman un ángulo, como se muestra en la Figura 8(b). Cuanto más largo es el periodo, más baja es la frecuencia; cuanto más corto es el periodo, más alta es la frecuencia.

El piezoeléctrico empleado en la alfombra piezoeléctrica fue un zumbador piezoeléctrico con una dimensión de 35 mm. Su

rango de frecuencias de operación abarcaba desde 400 Hz hasta 9 kHz, lo que significa que tenía una alta sensibilidad a las frecuencias elevadas o cuando se aplicaba la misma carga. Los datos característicos indicaron que este piezoeléctrico era más reactivo a las altas frecuencias o cuando se aplicaba el mismo peso de carga. Incluso una ligera inclinación de la presión resultaba en un corto período de presión y una mayor amplitud de la tensión de impulso. La medición de las características de la tensión de salida también podía utilizarse para determinar las especificaciones del convertidor de potencia.

4.2 Mediciones del sistema de captación de energía

Los resultados de las mediciones del sistema de captación de energía muestran que la tensión a través del condensador o batería aumenta con la adición de cada elemento, aunque el aumento no es lineal absoluto. Además, cada elemento adicional aumentaba la tensión del condensador en 0,1 V. Los resultados más altos se obtuvieron con una configuración en paralelo de 25 elementos conectados, donde la tensión del condensador alcanzó 0,57 V.

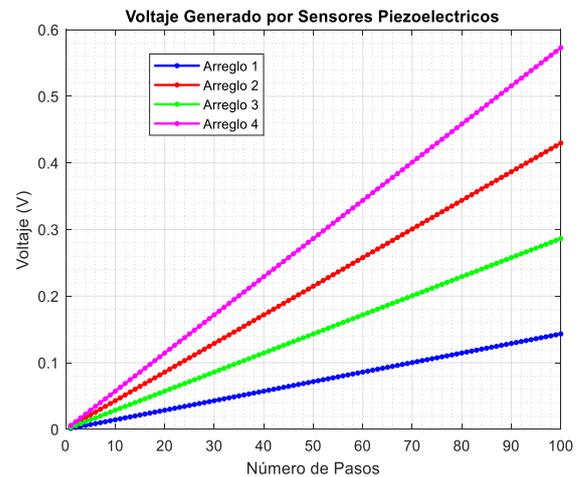


Figura 9. Comportamiento de carga y nivel de voltaje de la batería en base a distintos arreglos de sensores piezoeléctricos

La Figura 9 muestra las diferencias de cálculo para diferente número de sensores piezoeléctricos conectados en serie y paralelo. En este marco, el arreglo 1 consta de un solo sensor piezoeléctrico. El arreglo 2 consta de tres sensores piezoeléctricos conectados en serie y paralelo, de forma mixta. El arreglo 3 consiste en 6 elementos piezoeléctricos conectados de forma mixta. Por último, el arreglo 4 corresponde a 25 sensores piezoeléctricos conectados en una configuración mixta. Según el cálculo, los 25 elementos deberían haber producido una tensión de 1 V con un aumento de 0,1 V por cada elemento adicional. Sin embargo, en condiciones reales, la tensión de la batería solo pudo alcanzar 0,57 V.

La prueba de carga también puede ser calculada a partir de la información sobre el condensador o la batería, la energía que se convierte y la energía generada por la alfombra piezoeléctrica. La energía convertida sigue la relación definida en la Ecuación 7, la cual está vinculada a la energía

potencial derivada de los pasos sobre el módulo de recolección de energía piezoeléctrica. En este contexto, el valor del peso corporal (m) utilizado en la prueba fue de 70 kg, y el grosor del módulo (h) desde la superficie del suelo fue de 14 mm. Con la aceleración debida a la gravedad (g) establecida en $9,8 \text{ m/s}^2$, fue posible calcular la energía potencial correspondiente a cada paso.

$$I = 70 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,014\text{m} = 9,604 \text{ J/paso} \quad (7)$$

En la Tabla 2, se observa que se ha producido una energía de $18,59 \mu\text{J}$ utilizando un solo elemento. De manera simultánea, al seguir la configuración recomendada, el condensador se ha cargado con $297,4 \mu\text{J}$, lo que generó un aumento del voltaje a $0,57 \text{ V}$. Este resultado resalta la relación directa entre la energía capturada por el sistema piezoeléctrico y la energía final almacenada en el condensador, como se refleja en el nivel de voltaje. En consecuencia, un aumento significativo en el valor de la tensión representa un incremento proporcional en la cantidad de energía acumulada en el condensador.

Tabla 2. Energía generada por 4 arreglos distintos de sensores piezoeléctricos conectados en paralelo

Configuración	Energía total (uJ)	Energía por cada paso (uJ)	Configuración
Piezoeléctrico simple	18,59	0,46475	N/A
Arreglo de 3	58,19	1,45475	Serie/Paralelo
Arreglo de 6	99	2,475	Serie/Paralelo
Arreglo de 10	297,44	7,436	Serie/Paralelo

5. DISCUSIÓN

El prototipo de alfombra piezoeléctrica presentado logra niveles de energía recolectada similares o superiores. Por ejemplo, genera más energía por paso ($7,436 \mu\text{J}$) que el recolector en calzado reportado en (Qian et al., 2019) ($1,45475 \mu\text{J}$). Esto destaca la eficiencia del diseño propuesto. Asimismo, el uso de múltiples elementos piezoeléctricos en configuración paralelo permite incrementar la corriente generada, tal como se esperaba teóricamente y como se ha reportado en otros trabajos (Ali et al., 2023; Guido et al., 2016). Esta es una fortaleza del diseño que maximiza la energía recolectada.

Por otro lado, la medición detallada de las características del voltaje de salida es una contribución importante del estudio, puesto que permite determinar el rango de operación y sensibilidad de los elementos piezoeléctricos. Esta información es valiosa para seleccionar adecuadamente los componentes del sistema de captación y conversión de energía, como se sugiere en Raj & Ranganathan (2021). Además, el uso de una plataforma IoT para monitorear en tiempo real el voltaje y la corriente es un aspecto innovador que ninguno de los estudios previos reporta. Esto permite validar el funcionamiento del sistema y su capacidad de alimentar dispositivos electrónicos, convirtiéndolo en un prototipo más completo.

No obstante, si bien el aumento del voltaje con más elementos piezoeléctricos no es completamente lineal, el estudio logra identificar esta limitación y señala algunas causas posibles, como la distribución de presión. Se requieren más investigaciones para optimizar este aspecto, tal como sugieren Ali et al., 2023; Chen et al. (2020).

En conclusión, el diseño y experimentación con un prototipo funcionando demuestra la viabilidad y eficiencia de la propuesta. El estudio realiza contribuciones significativas en cuanto al aprovechamiento de la energía piezoeléctrica para la alimentación de dispositivos electrónicos.

6. CONCLUSIONES

El sensor piezoeléctrico de 35 mm de salida exhibe un comportamiento impulsivo y presenta una característica de voltaje que varía entre un mínimo de $1,2 \text{ V}$ y un máximo de 5 V . Estos datos pueden ser de utilidad como referencia en la configuración de convertidores específicos para lograr una captación de energía más efectiva. Según las pruebas de características, el sensor piezoeléctrico de 35 mm muestra mayor sensibilidad a impulsos de alta frecuencia. La alfombra piezoeléctrica propuesta ha generado $18,59 \mu\text{J}$ de energía para un solo elemento, $58,19 \mu\text{J}$ para tres elementos, $99 \mu\text{J}$ para seis elementos y $297,4 \mu\text{J}$ para diez elementos, con una energía promedio de $7,436 \mu\text{J}$.

Los resultados obtenidos de los elementos piezoeléctricos no exhiben una relación lineal con el número de elementos debido a las variaciones en la transformación de energía y la distribución desigual de la presión en cada paso. Estas variaciones impactan en la cantidad de energía generada por la alfombra piezoeléctrica. No obstante, tras el análisis realizado, se demuestra que este sistema de captación de energía piezoeléctrica puede considerarse como una fuente de suministro de energía viable para cargas de pequeña escala.

Con el presente artículo, se considera que en trabajos futuros esta investigación es de gran apoyo ya que surgen nuevas ideas como transformar canchas de fútbol convencional en un espacio sostenible y tecnológicamente avanzado mediante la instalación de una alfombra piezoeléctrica en su superficie. Esta alfombra aprovechará la energía generada por la actividad física de los jugadores y espectadores para alimentar diferentes sistemas y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

7. RECOMENDACIONES

A través de la presente investigación, se logró desarrollar con éxito un sistema de captación de energía piezoeléctrica mediante el uso de una alfombra compuesta por múltiples piezoeléctricos. Los resultados demostraron que al conectar varios elementos sensores en paralelo se incrementa considerablemente la energía generada, constituyendo así una solución factible para aprovechar las fuentes renovables de energía ambiental provenientes del movimiento humano.

No obstante, se presentan oportunidades promisorias de optimización orientadas a mejorar aún más el desempeño y

aplicabilidad del prototipo desarrollado. Entre las principales líneas de trabajo futuro identificadas se encuentran:

Implementar un circuito electrónico regulador con convertidor DC-DC que eleve el voltaje de salida, lo que permite cargar baterías de mayores capacidades y potenciar la explotación de la energía captada. Asimismo, diseñar un sistema de gestión de energía que almacene dinámicamente la energía obtenida, facilitando luego su transferencia a dispositivos externos mediante protocolos de comunicación estandarizados.

Del mismo modo, es conveniente realizar ensayos de fatiga en condiciones reales que evalúen el desempeño del dispositivo ante cargas estáticas y dinámicas complejas a lo largo del tiempo.

Por otro lado, se recomienda optimizar la distribución y diseño mecánico de los elementos sensores piezoeléctricos con el fin de maximizar la deformación generada ante diferentes estímulos aplicados sobre la superficie.

Al materializar estas innovaciones, se espera mejorar la eficiencia energética, control remoto y robustez del prototipo desarrollado, lo cual amplía su espectro de aplicaciones potenciales en el campo de la captación de energía ambiental. Los resultados de esta investigación sentarán las bases para futuros trabajos enfocados en perfeccionar este tipo de sistemas autoalimentados

REFERENCIAS

- Abdal, A. M., & Leong, K. S. (2019). Hybrid Energy Harvesting Scheme Using Piezoelectric and Thermoelectric Generators. *International Journal of Integrated Engineering*, 11(1), 19–26. <https://doi.org/10.30880/ijie.2019.11.01.003>
- Alhawari, M., Mohammad, B., Saleh, H., & Ismail, M. (2018). Energy Harvesting for Self-Powered Wearable Devices. In *Analog Circuits and Signal Processing*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62578-2>
- Ali, M., Bathaei, M. J., Istif, E., Karimi, S. N. H., & Beker, L. (2023). Biodegradable Piezoelectric Polymers: Recent Advancements in Materials and Applications. *Advanced Healthcare Materials*, 12(23), 1–32. <https://doi.org/10.1002/adhm.202300318>
- Cao, W., Yu, W., & Huang, W. (2019). A Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Applications. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 849, pp. 61–67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99695-0_8
- Chen, Y., Gu, C., Zhao, P., & Chen, W. (2020). Research on Piezoelectric Energy harvesting from Multi-Direction Wind-Induced Vibrations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 617(1), 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/617/1/012014>
- Dinulovic, D., Brooks, M., Haug, M., & Petrovic, T. (2015). Rotational Electromagnetic Energy Harvesting System. *Physics Procedia*, 75, 1244–1251. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.12.137>
- Fan, K., Yu, B., Zhu, Y., Liu, Z., & Wang, L. (2017). Scavenging energy from the motion of human lower limbs via a piezoelectric energy harvester. *International Journal of Modern Physics B*, 31(07), 1741011. <https://doi.org/10.1142/S0217979217410119>
- Fan, F., Tang, W., & Wang, Z. (2016). Flexible Nanogenerators for Energy Harvesting and Self-Powered Electronics. *Advanced Materials*, 28(22), 4283–4305. <https://doi.org/10.1002/adma.201504299>
- Guido, F., Quattieri, A., Algieri, L., Lemma, E. D., De Vittorio, M., & Todaro, M. T. (2016). AIN-based flexible piezoelectric skin for energy harvesting from human motion. *Microelectronic Engineering*, 159, 174–178. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2016.03.041>
- Huang, K., Zhang, H., Jiang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Sun, L., & Zhang, Y. (2022). The optimal design of a piezoelectric energy harvester for smart pavements. *International Journal of Mechanical Sciences*, 232, 107609. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107609>
- Kang, M.-G., Jung, W.-S., Kang, C.-Y., & Yoon, S.-J. (2016). Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies. *Actuators*, 5(1), 5. <https://doi.org/10.3390/act5010005>
- Kim, M.-O., Pyo, S., Oh, Y., Kang, Y., Cho, K.-H., Choi, J., & Kim, J. (2018). Flexible and multi-directional piezoelectric energy harvester for self-powered human motion sensor. *Smart Materials and Structures*, 27(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa722>
- Lin, Z., Chen, J., Li, X., Zhou, Z., Meng, K., Wei, W., Yang, J., & Wang, Z. L. (2017). Triboelectric Nanogenerator Enabled Body Sensor Network for Self-Powered Human Heart-Rate Monitoring. *ACS Nano*, 11(9), 8830–8837. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b02975>
- Moure, A., Izquierdo Rodríguez, M. A., Rueda, S. H., Gonzalo, A., Rubio-Marcos, F., Cuadros, D. U., Pérez-Lepe, A., & Fernández, J. F. (2016). Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 112, 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.030>
- Narita, F., & Fox, M. (2018). A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications. *Advanced Engineering Materials*, 20(5), 1–22. <https://doi.org/10.1002/adem.201700743>
- Niasar, E. H. A., Dahmardeh, M., & Googarchin, H. S. (2020). Roadway piezoelectric energy harvester design considering electrical and mechanical performances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(1), 32–48. <https://doi.org/10.1177/0954406219873366>
- Niroomand, M., & Foroughi, H. R. (2016). A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motions. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(4), 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.06.002>
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 3(1), 1167990. <https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1167990>
- Qian, F., Xu, T.-B., & Zuo, L. (2018). Design, optimization, modeling and testing of a piezoelectric footwear energy harvester. *Energy Conversion and Management*,

- 171(February), 1352–1364.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.069>
- Qian, F., Xu, T.-B., & Zuo, L. (2019). Piezoelectric energy harvesting from human walking using a two-stage amplification mechanism. *Energy*, 189, 116140. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116140>
- Quan, T., Wang, X., Wang, Z. L., & Yang, Y. (2015). Hybridized Electromagnetic–Triboelectric Nanogenerator for a Self-Powered Electronic Watch. *ACS Nano*, 9(12), 12301–12310. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b05598>
- Raj, J. S., & Ranganathan, G. (2021). Comparative Analysis of Modelling for Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. *Journal of Electrical Engineering and Automation*, 3(2), 138–153. <https://doi.org/10.36548/jeea.2021.2.006>
- Randriantsoa, A. N. A., Fakra, D. A. H., Rakotondrajaona, L., & Van Der Merwe Steyn, W. J. (2023). Recent Advances in Hybrid Energy Harvesting Technologies Using Roadway Pavements: A Review of the Technical Possibility of Using Piezo-thermoelectrical Combinations. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 16(4), 796–821. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00164-z>
- Roundy, S., & Trolrier-McKinstry, S. (2018). Materials and approaches for on-body energy harvesting. *MRS Bulletin*, 43(3), 206–213. <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.33>
- Saha, C. R., O'Donnell, T., Wang, N., & McCloskey, P. (2008). Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. *Sensors and Actuators A: Physical*, 147(1), 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.03.008>
- Song, P., Yang, G., Lang, T., & Yong, K.-T. (2019). Nanogenerators for wearable bioelectronics and biodevices. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(2), 023002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae44d>
- Vizzari, D., Genesseeux, E., Lavaud, S., Bouron, S., & Chailleux, E. (2021). Pavement energy harvesting technologies: a critical review. *RILEM Technical Letters*, 6, 93–104. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.131>
- Wang, Jasim, & Chen. (2018). Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review. *Applied Energy*, 212(December 2017), 1083–1094. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.125>
- Wang, Z. L., Chen, J., & Lin, L. (2015). Progress in triboelectric nanogenerators as a new energy technology and self-powered sensors. *Energy & Environmental Science*, 8(8), 2250–2282. <https://doi.org/10.1039/C5EE01532D>
- Wen, S., & Xu, Q. (2018). Design of a Novel Piezoelectric Energy Harvester for Scavenging Energy from Human Walking. *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2018-July, 792–797. <https://doi.org/10.1109/AIM.2018.8452343>
- Wu, Y., Qiu, J., Zhou, S., Ji, H., Chen, Y., & Li, S. (2018). A piezoelectric spring pendulum oscillator used for multi-directional and ultra-low frequency vibration energy harvesting. *Applied Energy*, 231(August), 600–614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.082>
- Xie, L., & Cai, M. (2014). Human Motion: Sustainable Power for Wearable Electronics. *IEEE Pervasive Computing*, 13(4), 42–49. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2014.67>
- Zhang, Y., Cao, J., Zhu, H., & Lei, Y. (2019). Design, modeling and experimental verification of circular Halbach electromagnetic energy harvesting from bearing motion. *Energy Conversion and Management*, 180(July 2018), 811–821. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.037>
- Zhao, J., & You, Z. (2014). A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors. *Sensors*, 14(7), 12497–12510. <https://doi.org/10.3390/s140712497>

BIOGRAFÍAS



Miguel, Portilla, Ingeniero Electrónico en Telecomunicaciones, Maestrante en Electricidad, mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la actualidad. Desde hace 10 años labora en Refinería Esmeraldas en el área de Mantenimiento Eléctrico con experiencia en mantenimiento de Subestaciones Eléctricas, configuraciones de Dispositivos Electrónicos Inteligentes en el área de Protecciones Eléctricas, Mantenimiento y Reparación de Switchgears de 13,2kV y Turbogeneradores de 6MW, Ingeniería Básica para diseño de planos de control y fuerza en la implementación de arrancadores de baja tensión y arrancadores suaves de media tensión, Supervisión de un sistema de deslastre de carga (Load Shedding), Redes y comunicaciones de sistema Scada.



Raúl, Ludeña, Ingeniero Eléctrico; maestrante en electricidad, mención energías renovables y eficiencia energética. Experiencia en diseño y construcción de proyectos eléctricos en redes de alta, media y baja tensión, en energías renovables y control industrial. Soporte técnico, diseño, configuración y montaje de sistemas de seguridad electrónica para inmuebles. Programador de equipos de domótica residenciales. Experto asesor de diseño y/o instalación de sistemas contra incendios en industrias



Victor, Asanza, Ingeniero electrónico con especialización en sistemas digitales y procesadores de código abierto. Posee una maestría en automatización y un doctorado en ciencias de la computación aplicada. Experto investigador en FPGA, inteligencia artificial y computación en el borde. Enfocado en el diseño de

sistemas inteligentes y colaborador destacado en el Grupo de Sistemas de Análisis de Datos Inteligentes (SDAS GROUP). Su trabajo se centra en investigaciones sobre sistemas integrados, procesadores RISC-V y tecnologías de interacción humano-máquina. Graduado en 2010 de ESPOL, Ecuador, ha estado contribuyendo activamente al campo desde entonces. El correo electrónico para contactarlo es: victor.asanza@sdas-group.com.

grupos de investigación de electricidad en la Universidad Católica de Cuenca y docencia en la Universidad Nacional de Educación.



Manuel, Nevarez, Ingeniero Eléctrico especializado en Electrónica y Automatización Industrial, Magister en Tecnologías para la Gestión y Práctica Docente, Máster en Industria 4.0. Experiencia en proyectos de Innovación Tecnológica, Fabricación Inteligente, Redes de sensores, Internet de las Cosas, Robótica

y Sistemas Ciberfísicos. Coordinador de Cuarto Nivel en la Unidad Académica del Área de Industria, Tecnología y Comunicación, Docente Investigador de la Carrera Tecnologías de la Información en la PUCE Esmeraldas. Fundador de la empresa INGELECON especializada en el diseño de aplicaciones de hardware y software libre para la solución de problemas a través de la automatización y creación de dispositivos electrónicos.



Miguel, Dávila, Ingeniero Electrónico en Sistemas Industriales y Telecomunicaciones - Universidad Politécnica Salesiana. Ingeniero Eléctrico - Universidad Politécnica Salesiana (2014). Magíster en Electricidad mención Redes Eléctricas Inteligentes - Universidad de Cuenca (2020).

Estudiante doctoral en Ingeniería Industrial - Universidad de Valladolid-España. Se desempeña como Ingeniero del Departamento AMI de la Empresa Eléctrica Regional Centrosur, docente de maestría en electricidad de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador sede Esmeraldas y de maestría en Sistemas de Propulsión Eléctrica en la Universidad del Azuay. Miembro de

Optimización Simultánea de los Parámetros de Esquemas de Desconexión Automática de Carga y Convertidores Grid-forming

Valles, José M.¹ ; González-Longatt, Francisco^{2*} ; Riquelme-Dominguez, José Miguel³ , Angeles-Camacho, César¹ 

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Ciudad de México, México

²Loughborough University, DIgEnSys-Lab Centre of Renewable Energy Systems Technology, Loughborough, Reino Unido

³Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, España

Resumen: Al reemplazar la generación síncrona con generación basada en convertidores, se reduce la inercia rotacional disponible en el sistema eléctrico. Esta disminución de inercia modifica el comportamiento dinámico del sistema, lo que provoca cambios más pronunciados en la frecuencia del mismo y aumenta la posibilidad de activar esquemas de disparo automático de carga (DAC). Con el fin de evitar la disminución de la inercia rotacional, en la literatura se han elaborado esquemas de control para los convertidores que emulan el comportamiento de las máquinas síncronas, conocidos como controles grid-forming. Este artículo presenta una metodología general que permite optimizar simultáneamente los parámetros de los esquemas DAC y convertidores grid-forming en sistemas de baja inercia rotacional. El objetivo es minimizar la carga disparada durante eventos de baja frecuencia. Se presentan dos aportaciones: la primera es el procedimiento para evaluar la función objetivo, que consiste en evaluarla mediante el uso de resultados de una simulación en el dominio del tiempo; la segunda es la integración de parámetros de control grid-forming al problema de optimización, con el fin de aprovechar la respuesta rápida de los convertidores y proporcionar una respuesta más eficiente ante eventos de baja frecuencia. La metodología ha sido validada mediante diversos casos de estudio desarrollados usando el sistema de potencia tradicional de 9 barras, presentado originalmente en el libro de P.M. Anderson. Los resultados obtenidos corroboran que la metodología propuesta reduce la activación del esquema DAC durante un evento de baja frecuencia.

Palabras clave: Optimización, Disparo Automático de Carga, Convertidores, Grid-forming

Simultaneous Optimization of the Parameters of Under-Frequency Load Shedding Schemes and Grid-forming Converters

Abstract: By replacing synchronous generation with converter-based generation, the rotational inertia available in the electrical system is reduced. This reduction in inertia modifies the dynamic behavior of the system, which causes more pronounced changes in the system frequency and increases the possibility of activating under-frequency load shedding (UFLS) schemes. In order to avoid the decrease in rotational inertia, novel control schemes for converters that emulate the behavior of synchronous machines have been developed in the literature, known as grid-forming controls. This article presents a general methodology that allows simultaneously optimizing the parameters of UFLS schemes and grid-forming converters in low rotational inertia systems. The goal is to minimize the load triggered during low frequency events. Two contributions are presented: the first is the procedure to evaluate the objective function, which consists of evaluating it by using the results of a time-domain simulation; The second is the integration of grid-forming control parameters to the optimization problem, with the aim of taking advantage of the fast response of the converters and providing a more efficient response to low frequency events. The methodology has been validated through various case studies developed using the traditional 9-bus power system, originally presented in the book by P.M. Anderson. The results obtained corroborate that the proposed methodology reduces the activation of the DAC scheme during a low frequency event.

Keywords: Optimization, Under Frequency Load Shedding, Converters, Grid-forming

*fglongatt@fglongatt.org
Recibido: 15/08/2023
Aceptado: 19/07/2024
Publicado en línea: 31/08/2024
10.33333/rp.vol54n1.07
CC 4.0

1. INTRODUCCIÓN

Es bien reconocido que uno de los retos asociados a la transición energética es la reducción en el número de máquinas sincrónicas conectadas a la red y el incremento en el número de tecnologías de generación utilizando convertidores electrónicos conectados a la red. La disminución de la cantidad de máquinas síncronas en el sistema de potencia genera una serie de dificultades, incluyendo la disminución en la capacidad de corrientes de falla, la limitación en la capacidad de potencia reactiva, la disminución en la robustez del sistema y la disminución en la inercia rotacional (Gonzalez-Longatt et al., 2019; Ortega & Milano, 2019).

La reducción de la inercia rotacional trae consigo una cantidad de problemas en el sistema de potencia tradicional, debido a que los fenómenos dinámicos comienzan a ser más rápidos. Esto es causado por menor energía cinética en las masas rotantes del lado de la generación para contrarrestar desbalances entre la generación y demanda. Si un desbalance es lo suficientemente grande al punto de superar la cantidad de reserva de generación, se tienen que tomar acciones correctivas para mantener la estabilidad de frecuencia del sistema (Adiyabazar et al., 2020). Una de las acciones correctivas que se toma es la activación de esquemas de disparo automático de carga (DAC) por baja frecuencia. Estos esquemas de emergencia en el control de la frecuencia tienen como objetivo balancear la generación con la demanda durante el evento de baja frecuencia mediante la desconexión de carga, evitando así la desconexión en cascada de la generación.

Un problema que puede ocurrir al tener mayor penetración de generación basada en convertidores electrónicos de potencia (llamados de aquí en adelante convertidores), es que, al tener dinámicas más rápidas, la activación de los esquemas DAC se vuelve más probable debido a que no se le está dando tiempo suficiente a la generación síncrona de actuar. Es reconocido en la literatura científica que los convertidores electrónicos de potencia, poseen una respuesta dinámica muchísima más rápida que la máquina síncrona (Rahmann & Castillo, 2014). En tal sentido, resulta atractivo el uso la capacidad rápida del convertidor electrónico de potencia para producir una respuesta similar a la del generador síncrono para ofrecer servicios que no han sido considerados en los sistemas de potencia tradicionales. Una manera popular para hacer esto, es la utilización de controles denominados formadores de red, o grid-forming, (Rosso et al., 2021) por su nombre en inglés (los autores utilizarán el nombre en inglés de aquí en adelante en este artículo). Estos controles dan la capacidad al convertidor a emular el comportamiento de una máquina síncrona, lo que permite dar una respuesta dinámica similar a las máquinas síncronas durante desbalances de generación/demanda, aumentando así la confiabilidad del sistema.

Otra manera para reducir la activación del DAC durante desbalances de carga-generación, es mediante un estudio detallado que logre optimización de los parámetros del DAC. Al optimizar los parámetros del DAC, se puede conseguir la mínima desconexión de la carga durante un evento de baja frecuencia al tiempo que satisface ciertas restricciones de operación del sistema de potencia (Adiyabazar et al., 2020). En este trabajo de investigación, se propone una metodología general para optimizar simultáneamente los parámetros del DAC y de convertidores electrónicos de potencia equipado con

control del tipo grid-forming para minimizar la desconexión de carga durante un evento mayor de baja frecuencia, al tiempo que se logra obtener una respuesta de frecuencia del sistema dentro de los parámetros operativos. Así, la metodología propuesta minimiza el impacto del evento en la activación del DAC; todo esto tomando las ventajas que los convertidores electrónicos de potencia y en especial los controles de tipo grid-forming. Dicha metodología se presenta en este artículo en manera de tutorial, con el objetivo de que el lector sea capaz de replicarla.

Para poder implementar la metodología propuesta, es necesario modelar y simular el sistema eléctrico de potencia adecuadamente. En esta investigación, se utiliza la representación de las cantidades eléctricas del tipo fasorial en secuencia positiva para un sistema eléctrico de potencia. Para efectuar las simulaciones en el dominio del tiempo se ha empleado el programa de computación llamado ePHASORSIM[®] de la compañía OPAL-RT[®]. Para modelar los convertidores con sus controles grid-forming, se ha desarrollado una librería de modelos usando el lenguaje de programación Modelica[®] (Mattsson & Elmqvist, 1997). ePHASORSIM[®] permite la integración simple de modelos en simulación en tiempo real empleando el hardware de simuladores de OPAL-RT[®].

En este trabajo, se empleó el sistema de potencia de prueba del WSCC 3-máquinas, 9-barras para probar la metodología propuesta. Este sistema ha sido empleado ampliamente en la literatura, y se considera uno de los sistemas estándar en el área de sistemas eléctricos de potencia. El sistema fue adaptado para incluir la dinámica electromecánica de las máquinas síncronas y sus controles.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se introduce el modelo de convertidor a usar, así como las ecuaciones que describen los modelos de control a utilizar. En la sección 3, se presenta la metodología propuesta, desarrolla el problema de optimización a resolver, y se expone la forma general a seguir para resolverlo. La sección 4 expone una validación de la metodología, así como los resultados al aplicarla a un sistema con convertidores grid-forming; en la sección 5 se dan las conclusiones.

2. MODELADO DE CONVERTIDORES

En esta sección, se introducirá el modelo utilizado para modelar el convertidor.

2.1 Modelo RMS de un convertidor

Para esta investigación se ha decidido utilizar el modelo RMS de un convertidor electrónico de potencia conectado a la red del tipo Convertidor de Fuente de Voltaje (voltaje source converter, VSC). Este modelo se representa como una fuente de voltaje ideal controlada con una impedancia en serie ($Z = R + jX$), y se muestra en la Figura 1.

Las entradas la fuente controlada de voltaje son V_m y $\angle\theta_m$ la magnitud en valores RMS del voltaje a ser sintetizado y el respectivo ángulo de fase del fasor. La corriente I es la corriente que entrega la fuente de voltaje, y V_T y $\angle\theta_T$ son la magnitud y el ángulo del voltaje en terminales del convertidor.

La resistencia R y la reactancia X de la impedancia en serie Z se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

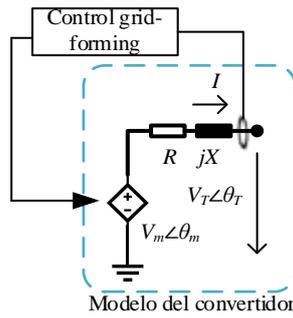


Figura 1. Circuito que representa el modelo RMS de un convertidor del tipo VSC mostrando el lazo de control para el tipo grid-forming

$$Z = \frac{uk}{100} \quad (1)$$

$$R = \frac{P_{cu}}{1000 * SB} \quad (2)$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3)$$

donde uk es la impedancia de cortocircuito en %, el cual se puede derivar de las impedancias en de los filtros del convertidor y del transformador de interconexión. El valor P_{cu} representa las pérdidas en el cobre en kW en los elementos del convertidor, y SB es la potencia base del sistema en MVA.

2.2 Controles grid-forming para convertidores

Los modelos de control denominados grid-forming se han planteado en la literatura científica como una opción válida para superar algunos de los retos de los sistemas de potencia con alta penetración de convertidores y baja participación de generadores sincrónicos, con un gran potencial para mejorar la respuesta de los convertidores ante disturbios del sistema (Habibullah et al., 2021).

El control del tipo grid-forming se puede realizar usando lazos de control de frecuencia y voltaje de los VSC. En la literatura científica moderna, se pueden encontrar múltiples propuestas para este tipo de control. En este trabajo, se ha decidido considerar los modelos de control de tipo grid-forming para VSC, los cuales se consideran como soluciones dominantes en los futuros sistemas de potencia:

- Control droop (Rosso et al., 2021)
- Máquina Síncrona Virtual (VSM) (Musca et al., 2022)
- Synchronverter (Sync) (Deepak et al., 2019; Zhong & Weiss, 2011)
- Oscilador virtual despachable (dVOC) (Ajala et al., 2021; Lu et al., 2021)

En las siguientes sub-secciones, se da una breve descripción de estos modelos de grid-forming, que incluye detalles de las ecuaciones necesarias para el modelado.

2.2.1 Control de droop

La base del control droop es emular el comportamiento del control primario de frecuencia que se utiliza en generador síncrono tradicional. El principio de control primario es que cualquier cambio en la potencia del sistema produce un cambio en la frecuencia, este cambio generalmente está dado por una

pendiente establecida por una ganancia de regulación primaria (Kundur, 2017). Este es un control que ha demostrado ser útil para repartir la potencia activa entre múltiples unidades de generación considerando una desviación de la frecuencia. De manera similar, los ingenieros han tomado las ventajas aportadas por la simplicidad de este control para efectuar el control de la potencia reactiva y el voltaje. A continuación, se muestran las ecuaciones usadas para modelar el lazo de control de potencia activa control droop:

$$\frac{dP_{act}}{dt} = \frac{P_{mea} - P_{act}}{T_p} \quad (4)$$

$$\Delta\omega_r = (P_{set} - P_{act})m_p \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \Delta\omega_r\omega_b \quad (6)$$

donde P_{set} es el punto de consigna de potencia en pu, P_{mea} es la potencia activa medida en pu, P_{act} es la potencia activa medida con un retraso de tiempo T_p , m_p es el droop de potencia activa, $\Delta\omega_r$ es la desviación de la velocidad angular en pu, ω_b es velocidad angular base en rads/s, y θ_m es el ángulo del vector de tensión de secuencia positiva.

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a las ecuaciones del lazo de control de potencia reactiva:

$$\frac{dQ_{act}}{dt} = \frac{Q_{mea} - Q_{act}}{T_q} \quad (7)$$

$$\Delta v = (Q_{set} - Q_{act})m_q \quad (8)$$

$$V_m = V_{set} + \Delta v \quad (9)$$

donde Q_{set} es el punto de ajuste de potencia reactiva en pu, Q_{mea} es la potencia reactiva medida en pu, Q_{act} es la potencia activa medida con un retraso de tiempo T_q , m_q es el droop de potencia reactiva, Δv es la desviación de voltaje, V_{set} es el punto de ajuste de voltaje y V_m es la magnitud del voltaje de secuencia positiva vector.

2.2.2 Máquina síncrona virtual (VSM)

La técnica de control denominada la máquina virtual síncrona (virtual synchronous machine, VSM) está basada en el intento de emular el comportamiento de una máquina síncrona, modelando la dinámica electromecánica en una versión reducida de la ecuación de oscilación de la máquina síncrona (Zhong, 2016). A continuación, se muestran las ecuaciones usadas el control del tipo VSM:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{P_{set} - P_{act} - D_p\Delta\omega_r}{T_a} \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \Delta\omega_r\omega_b \quad (11)$$

La constante de tiempo T_a es la denominada constante de aceleración en la máquina síncrona, y es conocido por la teoría de máquinas eléctricas que la constante de aceleración está relacionada con la denominada constante de inercia rotacional de la máquina H , ($T_a = 2H$). En algunos documentos científicos, se considera a H como la inercia del generador síncrono y puede denominarse constante de inercia virtual.

La ecuación de oscilación expandida incluye un término relacionado con el amortiguamiento de desviaciones de la velocidad. El amortiguamiento D_p se usa generalmente en el modelo clásico de la máquina síncrona y representa el cambio de carga proporcional al cambio de frecuencia. En el modelo VSM, la amortiguación D_p se puede emplear de manera similar al droop de frecuencia.

Algunos autores proponen que el control de voltaje del modelo VSM sea equivalente a un modelo de excitador proporcional simple. A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para representar el control de voltaje de VSM:

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{V_{mea} - V_{act}}{T_v} \quad (12)$$

$$V_x = (V_{ref} - V_{act})K_v \quad (13)$$

$$V'_m = \begin{cases} V_{max}, & V_x \geq V_{max} \\ V_x, & V_{min} < V_x < V_{max} \\ V_{min}, & V_x \leq V_{min} \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{dV_m}{dt} = \frac{V'_m - V_m}{T_{lpf}} \quad (15)$$

donde V_{mea} es el voltaje medido en terminales del convertidor, V_{act} es el voltaje medido con un retraso de tiempo T_v , K_v es la ganancia del control de voltaje, V_x es una variable auxiliar limitada por V_{min} y V_{max} que son el valor máximo y mínimo del voltaje de salida V'_m , V_m es el voltaje de salida retrasado por T_{lpf} que es la constante de tiempo de respuesta del control.

2.2.3 Synchronverter

El control, denominado *Synchronverter* (SynC) (Zhong & Weiss, 2011), es considerado una técnica de control para habilitar a los VSC como grid-forming. Este control es similar al modelo VSM, ya que busca emular el comportamiento de un generador síncrono. El controlador Synchronverter también utiliza las ecuaciones de oscilación para controlar la frecuencia; sin embargo, en lugar de la potencia activa, el SynC utiliza los pares T_{set} y T_e . El control SynC incluye una caída de control de potencia reactiva utilizada para regular el voltaje a través de la excitación de la máquina virtual. A continuación, se muestran las ecuaciones pertinentes al SynC:

$$T_{set} = \frac{P_{set}}{\omega_r} \quad (16)$$

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{T_{set} - T_e - \Delta\omega_r D_p}{T_a} \quad (17)$$

$$\omega_r = \omega_{ref} + \Delta\omega_r \quad (18)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \Delta\omega_r \omega_b \quad (19)$$

$$\theta_m = \theta_r + \frac{\pi}{2} \quad (20)$$

$$Q_{err} = Q_{set} - (V_{mea} - V_{ref})D_q - Q_e \quad (21)$$

$$\frac{dM_f i_f}{dt} = \frac{Q_{err}}{K_v} \quad (22)$$

$$T_e = M_f i_f * I_{abs} \sin(\theta_r - \theta_i) \quad (23)$$

$$V_m = \omega_r M_f i_f \quad (24)$$

$$Q_e = -V_m I_{abs} \cos(\theta_r - \theta_i) \quad (25)$$

donde P_{set} es el punto de consigna de potencia en pu, T_e es el par eléctrico, Q_e es la potencia reactiva, I_{abs} es la magnitud del fasor de corriente medido en el convertidor, θ_i es el ángulo del fasor de corriente, M_{ff} es la excitación simplificada de la máquina virtual, θ_r el ángulo del rotor virtual que retrasa el ángulo del fasor de voltaje por θ_m por $\pi/2$.

2.2.4 Oscilador virtual despachable (dVOC)

El modelo de control denominado dispatchable virtual oscillator (dVOC) es un control del tipo grid-forming para VSC inspirado en el control de oscilador virtual (VOC)

(Dhople et al., 2013). Este control controla el VSC para emular la dinámica de amortiguamiento no lineal, como el oscilador Van der Pol (Lu et al., 2019).

Estos osciladores pueden generar oscilaciones periódicas, autosostenidas y estables, y cuando se aprovechan como controladores para convertidores, estos ofrecen sincronización sin comunicación y uso compartido de la potencia, así como regulación de voltaje y frecuencia. Sin embargo, es importante mencionar que el VOC no es capaz de controlar la potencia activa y reactiva inyectada por el VSC a la red, por lo que recientemente, se ha desarrollado el denominado VOC despachable (dVOC) (Ajala et al., 2021).

El controlador está compuesto por un circuito tanque LC resonante y fuentes de corriente y voltaje no lineales dependientes del estado. Los autores en Lu et al. (2021) derivan un modelo dinámico para controlar el voltaje y la frecuencia del modelo dVOC. Estas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\frac{dV_m}{dt} = \frac{\xi}{k_v^2} V (2V_{nom}^2 - 2V^2) - \frac{k_v k_i}{3CV} (Q - Q^*) \quad (26)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{nom} - \frac{k_v k_i}{3CV^2} (P - P^*) \quad (27)$$

Se elige los factores de escala k_v y k_i como:

$$k_v = \frac{V_{nom}}{3V_{rated}} \quad (28)$$

$$k_i = \frac{3V_{nom}}{S_{rated}} \quad (29)$$

Al establecer la derivada $d\theta_m/dt = \omega$, el modelo por unidad del dVOC queda definido como:

$$\frac{dV_m}{dt} = 2\xi V_{pu} (1 - V_{pu}^2) - \frac{1}{\sqrt{2}CV_{pu}} (Q_{pu} - Q_{pu}^*) \quad (30)$$

$$\omega_{pu} = \omega_{ref} - \frac{1}{\sqrt{2}C\omega_b V_{pu}^2} (P_{pu} - P_{pu}^*) \quad (31)$$

Sin embargo, al inspeccionar la ecuación para el control de voltaje, se puede ver que el voltaje en estado estable solo puede ser $V = 1.00$ pu debido a la relación cuadrática. Para solucionar esto, el voltaje base debe configurarse diferente al voltaje nominal, $V_b \neq V_{nom}$. A partir de esto, las ecuaciones dinámicas del dVOC son las siguientes:

$$\frac{dV_m}{dt} = 2\xi V_{pu} \left(1 - \frac{V_{pu}^2 V_b^2}{V_{nom}^2} \right) - \frac{V_{nom}^2}{\sqrt{2}CV_{pu} V_b^2} (Q_{pu} - Q_{pu}^*) \quad (32)$$

$$\omega_{pu} = \omega_{ref} - \frac{V_{nom}^2}{\sqrt{2}C\omega_b V_{pu}^2 V_b^2} (P_{pu} - P_{pu}^*) \quad (33)$$

3. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

3.1 Métricas de frecuencia

La respuesta de la frecuencia estable de un sistema de potencia tradicional siguiente a un evento de pérdida de generación (o incremento de la demanda) se muestra en la Figura 2. La respuesta en frecuencia puede ser caracterizada por varios indicadores o métricas que definen la calidad de la respuesta.

Las métricas más comúnmente utilizadas son:

- (1) La derivada $\frac{df}{dt}$ de la frecuencia a lo largo del tiempo conocida como *rate of change of frequency* (RoCoF),
- (2) La frecuencia mínima f_{min} durante el disturbio, y el tiempo en el que ocurre la frecuencia mínima.
- (3) La frecuencia f_{ss} a la que se estabiliza el sistema.

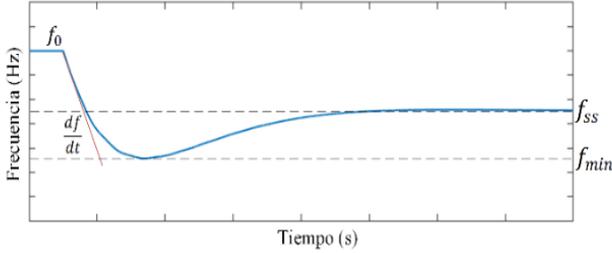


Figura 2. Típico evento de baja frecuencia estable, indicando tres métricas comúnmente usadas. f_{min} , f_{ss} , df/dt

3.2 Planteamiento general de un problema de optimización

En esta investigación, se busca minimizar la desconexión de carga de un sistema de potencia durante un evento de baja frecuencia. Para lograr eso, se toma ventaja de la respuesta rápida y capacidad de regulación de frecuencia que ofrecen los convertidores electrónicos de potencia con control de tipo grid-forming. En tal sentido, es necesario formular apropiadamente el problema de investigación en forma de un problema de optimización matemática.

Un problema de optimización puede ser visto como maximizar o minimizar el valor de una función objetivo $f(\mathbf{x})$. Esto se logra calculando los valores del vector de variables de control \mathbf{x} , para el cual la función objetivo evalúa al valor máximo o mínimo. Sin embargo, el problema típicamente incluye ciertas restricciones a fin de incluir condiciones adicionales que deben ser evaluadas. Las restricciones pueden ser formuladas matemáticamente en varias formas, pueden ser límites máximos y mínimos del vector \mathbf{x} , o condiciones que se deben cumplir.

La forma general del problema de optimización se puede generalizar de la siguiente manera:

$$\min_{\mathbf{x}} [f(\mathbf{x})] \quad (34)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} c(\mathbf{x}) &\leq 0 \\ ceq(\mathbf{x}) &= 0 \\ \mathbf{A}\mathbf{x} &\leq \mathbf{b} \\ \mathbf{A}eq\mathbf{x} &= \mathbf{beq} \\ lb &\leq \mathbf{x} \leq ub \end{aligned}$$

donde \mathbf{b} y \mathbf{beq} son vectores, \mathbf{A} y $\mathbf{A}eq$ son matrices, $c(\mathbf{x})$ y $ceq(\mathbf{x})$ son funciones no lineales que devuelven vectores, por último, lb y ub son los límites inferiores y superiores de las variables que conforman al vector \mathbf{x} .

3.3 Metodología Propuesta 1: Optimización de los ajustes DAC

La hipótesis de esta metodología es que los ajustes de los esquemas de DAC pueden ser óptimamente ajustados de manera tal que el valor total de la carga a ser desconectada sea minimizado considerando las restricciones operativas del sistema. La metodología propuesta en esta sección está

inspirada en el trabajo presentado originalmente en Acosta et al. (2020) y Sanchez Gorostiza et al. (2020).

El objetivo del problema de optimización es reducir el total de la desconexión de carga en el sistema (ΔP_{tot}), manteniendo la frecuencia de estado estable (f_{ss}) posterior al evento, dentro de los límites operativos. En este estudio, se considera un esquema DAC que desconecta la carga por bloques escalonados. Dichos esquemas, actúan desconectando un valor de carga $P_{shed,i}$, utilizando una lógica de disparo cuando la frecuencia cae por debajo de un valor ajustado ($f < f_{thr,i}$). La lógica de disparo va a actuar con un retraso de tiempo $T_{d,i}$, que puede ser diferente para cada etapa del esquema DAC.

La optimización de la configuración de un esquema DAC permite tener una menor desconexión de carga ante grandes disturbios que causen un evento de baja frecuencia. Partiendo de esta idea, la función objetivo $f(\mathbf{x})$ del problema de optimización se puede definir como el total de la desconexión de carga del sistema durante un evento de baja frecuencia:

$$\Delta P_{tot} = f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n_r} \sum_{i=1}^{n_s} P_{shed_{i,j}} \quad (35)$$

donde $P_{shed_{i,j}}$ es el deslastre de la etapa i del esquema DAC j , n_s es el número de etapas activadas del esquema DAC, y n_r el número de esquemas de DAC.

El problema de optimización busca minimizar el deslastre de carga $f(x)$, mediante la apropiada definición de las variables de control \mathbf{x} .

$$\min_{\mathbf{x}} [f(\mathbf{x})] \quad (36)$$

Teniendo ya la función objetivo y el objetivo del problema de optimización, el siguiente paso es definir las variables de control.

Este estudio considera los límites operativos definidos por la norma PRC-006-SERC-02 (SERC, 2008). Siguiendo los lineamientos de esta norma, la primera etapa del esquema DAC debe actuar dentro del rango de frecuencia 59,3 Hz $\leq f \leq 59,5$ Hz. Para ajustar las etapas siguientes, estas deben tener actuar en un valor de f_{thr} que tenga una diferencia respecto al ajuste anterior de al menos $\Delta f_{thr} = 0,2$ Hz, pero no más de $\Delta f_{thr} = 0,5$ Hz. En tal sentido, se tienen cuatro posibles variables de control para el problema de optimización que son P_{shed} , f_{thr} , Δf_{thr} y T_d . En este caso, se toman como variables de control P_{shed} , f_{thr} , y Δf_{thr} , la variable T_d no se considera, ya que tiene poco efecto sobre la función objetivo. Entonces, el vector de variables de control es definido de la siguiente manera:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{P}_{shed} \ \mathbf{f}_{thr} \ \Delta \mathbf{f}_{thr}]^T \quad (37)$$

$$\mathbf{P}_{shed} = [P_{shed_{1,1}} \ \dots \ P_{shed_{N_r, N_r}}] \quad (38)$$

$$\mathbf{f}_{thr} = [f_{thr_{1,1}} \ \dots \ f_{thr_{1, N_r}}] \quad (39)$$

$$\Delta \mathbf{f}_{thr} = [\Delta f_{thr_{1,1}} \ \dots \ \Delta f_{thr_{N_r-1, N_r}}] \quad (40)$$

Donde \mathbf{P}_{shed} es un vector que contiene cada valor de deslastre de carga, \mathbf{f}_{thr} es un vector con el primer valor de activación de cada esquema DAC, $\Delta \mathbf{f}_{thr}$ es un vector de deltas de frecuencia correspondientes a los valores de activación de las etapas del DAC, N_r es el número de etapas de los DAC.

Cómo siguiente paso, se utilizaron las recomendaciones de la norma PRC-006-SERC-02, para definir los límites superiores e inferiores, así como las funciones de desigualdad. La norma

también da indicaciones para los retrasos de tiempo T_d , mencionando que deben ser de al menos seis ciclos o 0,1s. Teniendo esto en cuenta, se definieron los límites superiores e inferiores de la siguiente manera:

$$59,3 \text{ Hz} \leq f_{thr,1} \leq 59,5 \text{ Hz} \quad (40)$$

$$0,2 \text{ Hz} \leq \Delta f_{thr} \leq 0,5 \text{ Hz} \quad (41)$$

$$0 \leq P_{shed} \leq 1 \quad (42)$$

Para finalizar se deben definir las desigualdades no lineales que debe respetar el algoritmo de optimización. Estas se definen considerando que la frecuencia de estado estable f_{ss} debe alcanzar un valor que se mantenga entre el rango de operación $f_{ss}^{min} \leq f_{ss} \leq f_{ss}^{max}$:

$$c1(\mathbf{x}) = f_{ss} - f_{ss}^{max} \leq 0 \quad (43)$$

$$c2(\mathbf{x}) = f_{ss}^{min} - f_{ss} \leq 0 \quad (44)$$

Por último, se agrega una desigualdad no lineal extra, esta se basa en que la norma PRC-006-SERC-02, no permite que el parámetro de la etapa final de un esquema DAC sea menor a 58,4 Hz.

$$c3(\mathbf{x}) = f_{thr,N_s} \leq 58,4 \text{ Hz} \quad (45)$$

Dónde N_s es el número de etapas del relevador.

La metodología propuesta 1 tiene la capacidad de optimizar los ajustes del esquema DAC para minimizar el deslastre de carga, pero no toma en consideración el posible uso de los convertidores equipados con control del tipo grid-forming. En la siguiente subsección se presenta una metodología donde los parámetros del control grid-forming son incluidos en el problema de optimización.

3.4 Metodología Propuesta 2: Optimización de los ajustes UFLS y parámetros de control grid-forming

En esta sección, los autores proponen una metodología original para incluir en el problema de optimización simultánea de los parámetros del esquema DAC y el control del tipo convertidores grid-forming, con el objetivo de la reducción de deslastre de carga en eventos de baja frecuencia. En esta propuesta la función objetivo es nuevamente definida como el total del deslastre de carga del sistema que fue definido previamente en la Ecuación (35) y se busca minimizar la función $f(\mathbf{x})$ según lo establecido en la Ecuación (36).

Las variables de control empleadas en la optimización deben incluir los parámetros de interés del esquema DAC, según la Ecuación (37) y del control grid-forming. A manera de ejemplo se definen las variables controlables del modelo VSM presentado en la Sección 2,2,2.

El control VSM tiene como parámetros: la constante de inercia virtual T_a , la constante de amortiguamiento virtual D_p , y la constante de regulación de voltaje K_v . En esta investigación, se eligió utilizar las constantes D_p y T_a como variables de control. La razón tras esta decisión, es que se puede sintonizar el valor de D_p al valor de las constantes de regulación primaria si se define como $D_p = 1/R_{gfm}$. La constante de aceleración T_a del control VSM se puede incluir en el planteamiento del problema de optimización, especialmente para mejorar la respuesta en frecuencia del sistema en escenarios de baja

inercia rotacional. En esta metodología, no se toman en cuenta los controles de voltaje de los convertidores grid-forming debido a que se están considerando como desacoplados los comportamientos de la frecuencia y el voltaje.

Entonces, el vector de variables de control se define de la siguiente manera:

$$\mathbf{x} = [P_{shed} \mathbf{f}_{thr} \Delta \mathbf{f}_{thr} \mathbf{R}_{gfm} \mathbf{T}_a]^T \quad (46)$$

$$\mathbf{R}_{gfm} = [R_{gfm_1} \dots \dots R_{gfm_{n_g}}] \quad (47)$$

$$\mathbf{T}_a = [T_{a_1} \dots \dots T_{a_{n_g}}] \quad (48)$$

Dónde \mathbf{R}_{gfm} y \mathbf{T}_a son vectores conformados por las ganancias de regulación primaria y de inercia virtual de los convertidores grid-forming. Para definir los límites inferiores y superiores del valor de \mathbf{R}_{gfm} se ha considerado lo establecido en el código de red mexicano (Energía, 2016), donde se recomiendan los siguientes valores:

$$3\% \leq \mathbf{R}_{gfm} \leq 8\% \quad (49)$$

Con esta modificación del vector de variables de control (\mathbf{x}), y agregando los respectivos límites, se puede considerar este problema de optimización como una extensión del problema de optimización de parámetros del esquema DAC.

3.5 Implementación de la metodología optimización

Para formular y resolver el problema de optimización expuesto en las metodologías anteriormente propuestas, se ha implementado un esquema centrado en el uso del lenguaje de programación de MATLAB®. El uso de MATLAB® se fundamenta, debido a que un objetivo a futuro es probar y demostrar las metodologías propuesta en tiempo real, usando la plataforma de modelación y simulación RT-LAB® de OPAL-RT®; la cual utiliza MATLAB® y SIMULINK®.

En la Figura 3, se muestra un diagrama general de la implementación para resolver el problema de optimización. La interfaz utiliza diferente software de modelado y simulación, permitiendo que a futuro pueda ser expandida fácilmente. Para modelar los convertidores grid-forming, se ha utilizado el software OpenModelica®, el cual cuenta con la habilidad de exportar los modelos desarrollados en formato 'fmu'. Posteriormente, estos modelos pueden ser integrados de manera sencilla al simulador de transitorios electromecánicos ePHASORSIM® y así ser resueltos en régimen dinámico. A su vez, ePHASORSIM® es una librería para el software SIMULINK® que está incluida en la plataforma de simulación RT-LAB®. Al operar dentro de SIMULINK®, se pueden también utilizar bloques de SIMULINK® para hacer control de elementos del sistema de potencia. En este caso, el esquema DAC ha sido modelado dentro de SIMULINK®, y para calcular la frecuencia de los buses del sistema, se está utilizando un bloque de SIMULINK® que utiliza la derivada del ángulo de fase para estimar la frecuencia de cada bus. Esta señal de frecuencia es utilizada para evaluar los disparos de los esquemas de DAC.

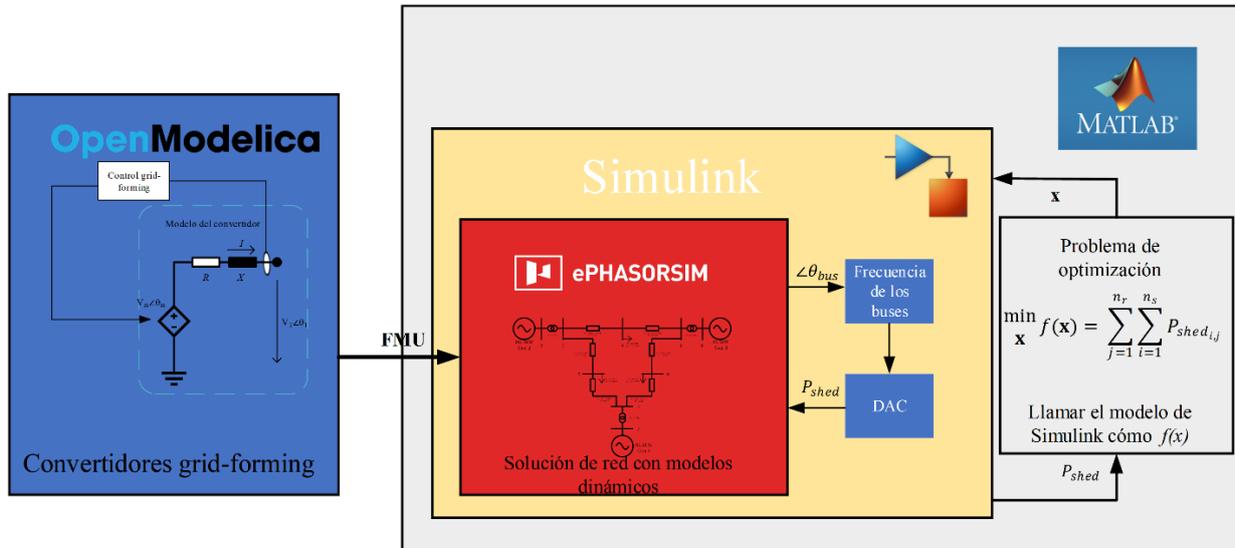


Figura 3. Esquema general de la implementación del algoritmo de optimización. Se muestra el enlace entre las diferentes herramientas de software utilizadas

4. RESULTADOS

En esta investigación, se utiliza un reconocido sistema de prueba con todos los detalles de modelación para incluir la dinámica electromecánica del sistema. Dicho sistema es WSCC 3-máquinas, 9-barras conocido como el sistema de P.M Anderson, que fue introducido en el libro Estabilidad y Control de Sistemas de Potencia (Anderson & Fouad, 2003). Dicho modelo representa un sistema de transmisión que consiste de 9 barras, 3 generadores, 6 líneas, 3 transformadores y 3 cargas. La red ha sido ampliamente utilizada en la academia para probar nuevas teorías y conceptos, y en software tanto abiertos, como comerciales para validación de modelos.

Posteriormente, se mostrarán los resultados de dos casos de estudios. En el Caso 1, inicialmente, se valida el funcionamiento de la metodología de optimización solamente para ajustar los parámetros de los esquemas DAC en el sistema de 9 barras operando con máquinas síncronas. Luego, se procede a probar y validar la metodología en el sistema, pero con la inclusión de convertidores grid-forming. En el caso 2, se utilizará el mismo sistema de prueba, pero se buscará optimizar simultáneamente los parámetros de los esquemas DAC y los parámetros de los convertidores grid-forming.

4.1 Caso 1: Optimización de parámetros de esquemas DAC

Inicialmente, se valida la metodología propuesta usando el sistema WSCC 9-barras. En este estudio, se utiliza una versión modificada de la originalmente propuesta por el Prof. Fouad, las modificaciones consisten en utilizar el modelo de máquina síncrona llamado GENROU para modelar los generadores; dicho modelo es equivalente al Modelo 2,2 en Machinery Committee of the IEEE Power (2019), cuando se consideran las reactancias subtransitorias x_d' y x_q' tienen el mismo valor. Se agregan controles a los generadores, en este caso se utilizan EXST1 y TGOV1 para el excitador y el gobernador,

respectivamente. Estos modelos se seleccionan porque están bien documentados en la literatura, son fáciles de implementar y están incluidos en la mayoría de los softwares de simulación, facilitando así la reproducción de los resultados. Los diagramas de bloques y la documentación de los modelos dinámicos mencionados anteriormente se pueden encontrar en (OPAL-RT Technologies, 2023; PowerWorld Corporation, n.d.). Se plantean dos escenarios para este caso de estudio:

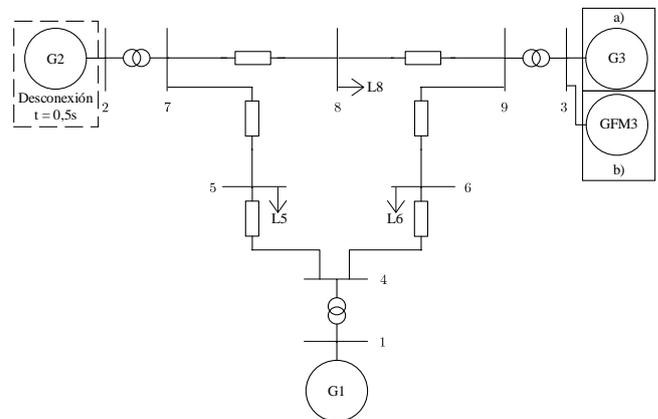


Figura 4. Diagrama unifilar del sistema WSCC 9-barras. Se desconecta el generador G2 en $t = 0,5s$, y el generador conectado a la barra 3 se considera como a) generador síncrono en el Caso 1, Escenario 1, y b) convertidor grid-forming para el Caso 1, Escenario 2 y el Caso 2.

Escenario 1: Optimización de esquemas DAC en un sistema con generación síncrona. Se optimizan los esquemas DAC incluyendo solo la dinámica electromecánica de las máquinas. La idea de este escenario es verificar la validez de la metodología y la implementación, demostrar que el concepto funciona. Este escenario tiene como objetivo mostrar la evolución de la frecuencia en el tiempo al ocurrir un disturbio en la red. La simulación consiste en la desconexión repentina de la máquina G2 en el tiempo $t = 0,50s$, la simulación termina en $t=20,00s$ y el paso de tiempo es de $\Delta t=0,001s$. Esto se

traduce en una pérdida de generación $P = 163,00$ MW, y $Q = 6,65$ Mvar. La reserva de potencia activa entre las máquinas G1 y G3 es de $P = 293,53$ MW. En este caso, se realiza una optimización de la configuración del esquema de DAC para sistema de 9 barras operando con máquinas síncronas. Este sistema de prueba cuenta con tres cargas, las cargas se ubican en los buses 5, 6, y 8. Cada carga contará con un esquema DAC a ser optimizado, y se llamarán L5, L6, y L8, respectivamente. Para este caso de optimización, las condiciones iniciales de los esquemas DAC se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones iniciales del esquema DAC

	f_{thr} [Hz]	T_d [s]	P_{shed} [pu]
L5	59,45	0,15	0,30
L6	59,20	0,15	0,15
L8	58,95	0,15	0,05

En la Figura 4, se muestra la evolución del algoritmo de optimización en cada iteración. El deslastre de carga final es de $P_{shed} = 1,26495$ pu de la carga, lo que representa un deslastre de 126,495 MW de potencia activa, para mantener la frecuencia de estado estacionario dentro de los límites preestablecidos de $59,5 \text{ Hz} < f_{ss} < 60,5 \text{ Hz}$, y se respeta los límites de las variables de optimización presentadas en las ecuaciones (40-42).

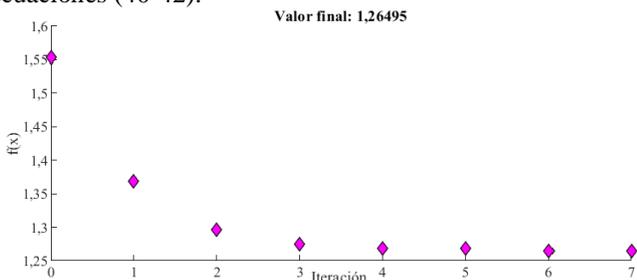


Figura 5. Curva de convergencia del algoritmo de optimización de DAC para el Caso 1

En la Tabla 2, se muestran los resultados finales de los parámetros óptimos de los esquemas DAC.

Tabla 2. Resultados optimización del Escenario 1. Sistema tradicional con GS.

	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total [pu]	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,218	0,000	0,000	0,219	59,369	59,119	58,869
L6	0,289	0,184	0,106	0,581	59,300	59,050	58,800
L8	0,283	0,143	0,039	0,465	59,353	59,103	58,853
Total				1,265			

Escenario 2: Optimización de DAC en un sistema con convertidores grid-forming, sin optimizar parámetros de control. En este escenario, se realizarán simulaciones de optimización de esquemas DAC, con la diferencia de que se reemplaza un generador síncrono por un convertidor grid-forming. La simulación es la misma que en el caso pasado, y consiste en la desconexión repentina de la máquina G2 en el tiempo $t = 0,50$ s, la simulación termina en $t=20,00$ s y el paso

de tiempo es de $\Delta t=0,001$ s. A esto se le agrega que el G3 es cambiado por un convertidor grid-forming llamado GFM3.

Se aplicarán diferentes controles grid-forming a GFM3 con el objetivo de analizar cómo difiere la solución óptima al incluir diferentes dinámicas de control. Los controles grid-forming se sintonizaron para que se tenga una respuesta similar al generador síncrono G3. Las condiciones iniciales del esquema DAC son las mismas que en la Tabla 1.

En la Tabla 3, se muestran los resultados de las optimizaciones antes mencionadas. En algunos casos, los resultados de la metodología de optimización se ajustan parámetros de la tercera etapa de los esquemas de DAC. Esto debido a que durante las primeras iteraciones se llegaba a superar la frecuencia de operación de la tercera etapa, pero en los casos finales no es necesaria su activación. Esto debido a que se están optimizando los parámetros de la frecuencia de activación de las etapas en conjunto con la desconexión de carga por etapa.

Se puede observar que la desconexión de carga final es similar al Escenario 1. Esto valida dos puntos: 1) La metodología es aplicable a casos con máquinas síncronas y convertidores grid-forming. 2) Los convertidores grid-forming son capaces de emular satisfactoriamente el comportamiento de una máquina síncrona. La única excepción a este caso es el control dVOC, el cual está diseñado para proveer una respuesta más rápida

Tabla 3. Resultados de optimización del caso 1, escenario 2. Se muestran los parámetros óptimos de los DAC cuando el sistema opera con un convertidor grid-forming y se prueban diferentes técnicas de control. Se resalta en gris las etapas no activadas en la solución final.

VSM	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,025	0,000	0,044	0,070	59,489	59,239	58,989
L6	0,400	0,269	0,044	0,669	59,328	59,079	58,829
L8	0,337	0,188	0,048	0,526	59,323	59,073	58,823
Total				1,264			
Droop	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,149	0,042	0,063	0,191	59,434	59,184	58,934
L6	0,364	0,231	0,044	0,595	59,480	59,230	58,980
L8	0,332	0,155	0,048	0,487	59,485	59,235	58,985
Total				1,273			
SynC	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,000	0,000	0,063	0,000	59,398	59,148	58,898
L6	0,487	0,362	0,026	0,848	59,355	59,105	58,855
L8	0,281	0,113	0,048	0,395	59,332	59,082	58,832
Total				1,243			
dVOC	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,145	0,000	0,063	0,145	59,449	59,199	58,949
L6	0,267	0,138	0,044	0,405	59,431	59,181	58,932
L8	0,296	0,151	0,048	0,448	59,440	59,190	58,940
Total				0,998			

ante disturbios, reduciendo así la carga desconectada.

4.2 Caso 2: Optimización de parámetros de esquemas DAC y de parámetros de convertidores con control grid-forming

Este caso busca validar la propuesta de la metodología de optimización de parámetros de convertidores con control grid-forming presentada en la Sección 3.3. En esta situación, se realizarán dos escenarios. El escenario será el mismo que en el Caso 1, pero se reemplazaron los generadores síncronos G1 y G3 por dos convertidores grid-forming a los que se llamó GFM1 y GFM3. Estos convertidores estarán operando con control VSM y sus controles serán sintonizados para emular los generadores reemplazados. En el primer escenario solamente se optimizarán los parámetros de los esquemas de DAC, con el objetivo de tener una comparativa de la optimización sin incluir los parámetros de control grid-forming. En el segundo escenario se incluyen los parámetros de los convertidores grid-forming, y a su vez, se optimizan los parámetros de los esquemas de DAC.

Con el objetivo de realizar una comparación, en la Tabla 4 se muestran los resultados de estos dos escenarios. Al incluir los parámetros de convertidor en el problema de optimización, se observa una desconexión de carga menor en comparación al caso sin optimización de parámetros. La diferencia entre ambos es de $\Delta P = 20,00$ MW, lo que significa una reducción de 15,84 % en el deslastre de carga en comparación al caso sin optimización de parámetros. En ambos escenarios, se llega al mismo valor de frecuencia de estado estable de $f_{ss} = 59,50$ Hz.

En la Figura 6, se muestra la desconexión de carga para ambos resultados de la optimización. Con estos resultados, se concluye que la metodología de optimización propuesta es capaz de minimizar la cantidad de carga desconectada en eventos de baja frecuencia. La razón es que, al incluir los parámetros de los convertidores en el problema de optimización, se está tomando ventaja de la capacidad de los convertidores para responder de manera rápida ante eventos de baja frecuencia.

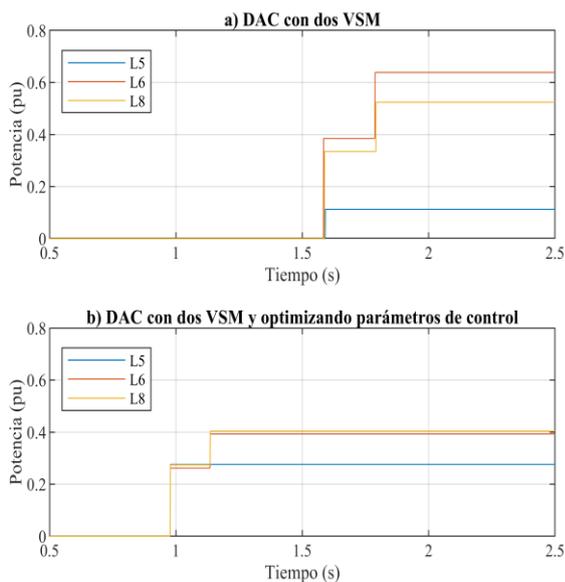


Figura 6. Desconexión automática de carga en el sistema WSCC 3-máquinas cuando: a) se optimizan solamente los parámetros del DAC, b) se optimizan los parámetros del DAC y del control grid-forming.

Con estos resultados, se concluye que la metodología de optimización propuesta es capaz de minimizar la cantidad de carga desconectada en eventos de baja frecuencia. La razón es que, al incluir los parámetros de los convertidores en el problema de optimización, se está tomando ventaja de la capacidad de los convertidores para responder de manera rápida ante eventos de baja frecuencia.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este artículo científico presenta una metodología de optimización simultánea de los parámetros de los esquemas DAC y de los convertidores grid-forming en sistemas de baja inercia rotacional. El objetivo es reducir el deslastre de carga en un sistema de potencia después de un evento de baja frecuencia. Como resultado de la aplicación de esta metodología, se obtiene un menor deslastre de carga al ocurrir disturbios de baja frecuencia, y se evita así la desconexión excesiva de carga, y se valida efectivamente la hipótesis.

Cómo comparación con el estudio realizado por Sanchez Gorostiza et al. (2020), se centra en la optimización de parámetros de clústeres de vehículos eléctricos (EVs) para proporcionar una respuesta de frecuencia rápida (FFR) en sistemas de potencia con niveles decrecientes de inercia rotacional. Una diferencia importante es la filosofía de modelado utilizada en el artículo mencionado, la cual se enfoca en modelar el sistema de potencia usando un modelo de orden reducido, mientras en el trabajo presente se utiliza un modelado completo en secuencia positiva con modelos más elaborados, tanto de los convertidores, cómo de la red. Aunque ambos estudios comparten un enfoque en la optimización de parámetros con objetivo de la reducción de deslastre de carga, el estudio presentado en este artículo se centra en la optimización simultánea de los parámetros de los esquemas de desconexión automática de carga (DAC) y los convertidores grid-forming.

Mirando hacia el futuro, se podría expandir los modelos de los convertidores para incluir también un modelo de la fuente de energía, ya sea almacenamiento de energía o fuentes renovables. También, se pueden considerar otros tipos de técnicas de optimización y modelado para reducir el tiempo computacional. Además, se reconoce que el modelo de los convertidores podría mejorarse si asimismo, se incluyen los limitadores de corriente. Igualmente, se podría utilizar alguna técnica matemática, para detectar previo a la optimización, qué generadores aportan más a la frecuencia durante el disturbio, y enfocarse en esos durante el proceso de optimización, reduciendo el costo computacional del algoritmo.

Tabla 4. Resultados de optimización del Caso 2. Se muestran los parámetros óptimos de los DAC cuando el sistema opera con un convertidor grid-forming y se prueban diferentes técnicas de control. Se resalta en gris las etapas no activadas en la solución final.

Optimización sin parámetros de GFM							
	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total [pu]	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,113	0,000	0,063	0,1129	59,456	59,206	58,956
L6	0,385	0,253	0,044	0,6383	59,464	59,214	58,964
L8	0,334	0,189	0,048	0,5240	59,460	59,210	58,960
Total				1,275			
Optimización de parámetros de GFM							
	P_{shed1} [pu]	P_{shed2} [pu]	P_{shed3} [pu]	Total [pu]	f_{thr1} [Hz]	f_{thr2} [Hz]	f_{thr3} [Hz]
L5	0,276	0,000	0,063	0,276	59,450	59,200	58,950
L6	0,262	0,130	0,044	0,392	59,450	59,200	58,950
L8	0,274	0,129	0,048	0,404	59,450	59,200	58,950
Total				1,073			
	R_{gfm} [pu]	T_a [s]					
GFM 1	0,030	12,150					
GFM 3	0,030	6,540					

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al CONAHCYT por el apoyo económico brindado al M.I. José Martín Valles Canales para realizar su proyecto doctoral. Se extiende también un agradecimiento a la UNAM por brindar apoyo al M.I. José Martín Valles Canales para realizar una estancia en el DIgEnSys-Lab liderado por el Prof. Francisco González-Longatt en el Reino Unido.

REFERENCIAS

- Acosta, M. N., Gonzalez-Longatt, F., Denysiuk, S., & Strelkova, H. (2020). Optimal Settings of Fast Active Power Controller: Nordic Case. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 - Proceedings*, 63–67. <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160281>
- Anderson, P. M., & Fouad, A. A. (2003). *Power System Control and Stability* (2nd ed.). IEEE Press.
- Adiyabazar, C., Gonzalez-Longatt, F., Acosta, M. N., Rueda, J. L., & Palensky, P. (2020). Optimal UFLS settings: An assessment of frequency system response indicators. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2020-Octob*, 1141–1145. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248760>
- Ajala, O., Lu, M., Dhople, S., Johnson, B. B., & Dominguez-Garcia, A. (2021). Model Reduction for Inverters with Current Limiting and Dispatchable Virtual Oscillator Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8969(c), 1–9. <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3083488>
- Deepak, D., Raisz, D., Musa, A., Ponci, F., & Monti, A. (2019). Inertial control applied to synchronverters to achieve linear swing dynamics. *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference and 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics, PQ and SEEM 2019*, 727481, 0–5. <https://doi.org/10.1109/PQ.2019.8818273>
- Dhople, S. V., Johnson, B. B., & Hamadeh, A. O. (2013). Virtual Oscillator Control for voltage source inverters. *2013 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton 2013*, 1359–1363. <https://doi.org/10.1109/Allerton.2013.6736685>
- Energía, C. R. de. (2016). Código de Red. *Diario Oficial de La Federación*.
- Gonzalez-Longatt, F., Sanchez, F., & Leelaruji, R. (2019). Unveiling the Character of the Frequency in Power Systems. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia, GTD Asia 2019*, 57–62. <https://doi.org/10.1109/GTDAsia.2019.8715972>
- Habibullah, M., Gonzalez-Longatt, F., Acosta Montalvo, M. N., Chamorro, H. R., Rueda, J. L., & Palensky, P. (2021). On short circuit of grid-forming converters controllers: A glance of the dynamic behaviour. *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2021*. <https://doi.org/10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543017>
- Kundur, P. S. (2017). Power system dynamics and stability. In *Power System Stability and Control, Third Edition*. <https://doi.org/10.4324/b12113>
- Lu, M., Dutta, S., Purba, V., Dhople, S., & Johnson, B. (2019). A grid-compatible virtual oscillator controller: Analysis and design. *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, 2643–2649. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8913128>
- Lu, M., Mallik, R., Johnson, B., & Dhople, S. (2021). Dispatchable Virtual-oscillator-controlled Inverters with Current-limiting and MPPT Capabilities. *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings*, 3316–3323. <https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595530>
- Machinery Committee of the IEEE Power, E. (2019). *IEEE Std 1110-2019: IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses* (Vol. 2019). IEEE Standards Association.

- Mattsson, S. E., & Elmqvist, H. (1997). Modelica - An International Effort to Design the Next Generation Modeling Language. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(4), 151–155. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)43628-7](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)43628-7)
- Musca, R., Gonzalez-Longatt, F., & Sánchez, C. A. G. (2022). Power System Oscillations with Different Prevalence of Grid-Following and Grid-Forming Converters. *Energies*, 15(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/en15124273>
- OPAL-RT Technologies. (2023). *ePHASORSIM Documentation*. <https://opal-rt.atlassian.net/wiki/spaces/PEUD/pages/144505576/Native+Library>
- Ortega, Á., & Milano, F. (2019). Combined Frequency and RoCoF Control of Converter-Interfaced Energy Storage Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(4), 240–245. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.198>
- PowerWorld Corporation. (n.d.). *PowerWorld Block Diagrams*. <https://www.powerworld.com/files/Block-Diagrams-18.pdf>
- Rahmann, C., & Castillo, A. (2014). Fast frequency response capability of photovoltaic power plants: The necessity of new grid requirements and definitions. *Energies*, 7(10), 6306–6322. <https://doi.org/10.3390/en7106306>
- Rosso, R., Wang, X., Liserre, M., Lu, X., & Engelken, S. (2021). Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends—A Review. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2(May), 93–109. <https://doi.org/10.1109/ojia.2021.3074028>
- Sanchez Gorostiza, F., Gonzalez-Longatt, F., & Rueda, J. L. (2020). Multi-objective optimal provision of fast frequency response from EV clusters. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(23), 5580–5587. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2020.0717>
- SERC. (2008). *PRC-006-SERC-02*. 1–13.
- Zhong, Q. C., & Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1259–1267. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2048839>
- Zhong, Q. C. (2016). Virtual Synchronous Machines: A unified interface for grid integration. *IEEE Power Electronics Magazine*, 3(4), 18–27. <https://doi.org/10.1109/MPPEL.2016.2614906>

BIOGRAFÍAS



José Martín, Valles Canales, es un estudiante de Doctorado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Su especialidad es en Ingeniería Eléctrica, Sistemas Eléctricos de Potencia. Tiene una Maestría en Ingeniería Eléctrica en Sistemas Eléctricos de potencia por la UNAM, y es Ingeniero en Energías

Renovables por el Tecnológico Nacional de México. Actualmente está realizando una estancia en la Universidad de Loughborough en el Reino Unido y su trabajo se centra en la estabilidad de frecuencia en

sistemas de potencia con penetración de convertidores. <https://orcid.org/0009-0002-9563-1560>



Francisco M., Gonzalez-Longatt, es fundador y líder de DIGEnSys-Lab (Laboratorio de Sistemas de Energía Digital) en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Tecnología de la Información y Cibernética de la Universidad del Sudeste de Noruega, Noruega; Actualmente trabaja en el Centro de Tecnología de Sistemas de Energía Renovable (CREST) en Loughborough, Universidad en el Reino Unido. Su principal área de interés es potenciar la operación segura y resiliente de los sistemas de energía aprovechando las ventajas de las tecnologías digitales. <https://orcid.org/0000-0002-7157-9844>



José Miguel, Riquelme-Dominguez, nació en España en 1993. Recibió el Grado en Ingeniería Industrial y el Máster en Ingeniería Industrial por la Universidad de Sevilla. Obtuvo el título de doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica por la Universidad Politécnica de Madrid. Su experiencia laboral incluye el operador del sistema eléctrico

español, Red Eléctrica de España. Desde 2018 forma parte del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Madrid, donde actualmente ejerce de Profesor Ayudante. Sus principales áreas de interés son: sistemas fotovoltaicos conectados a la red, y la estabilidad y el control de sistemas eléctricos de potencia. <https://orcid.org/0000-0001-9741-0388>



César, Angeles-Camacho, recibió la licenciatura y maestría en ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Michoacán, México, en 1992 y 2000, respectivamente, y el doctorado de la Universidad de Glasgow, Glasgow, Escocia, Reino Unido, en 2005. Es Profesor Asociado de la Universidad Nacional

Autónoma de México, México. Es fundador y líder del Laboratorio de Investigación de Redes Eléctricas Inteligentes en el Instituto de Ingeniería, UNAM. Sus intereses de investigación incluyen el desarrollo de aplicaciones para redes eléctricas inteligentes, modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia. <https://orcid.org/0000-0002-9499-2842>

Effect of Total Replacement of Quarry Aggregate by River Aggregate on the Strength of Concrete

Monje Yovera, Paul Mauricio¹ ; Muñoz Perez, Socrates Pedro^{2*} ; Villena Zapata, Luigi Italo³ ; García Chumacero, Juan Martín¹ ; Díaz Ortiz, Edwin Adolfo² ; Quispe Osorio, José Luis² 

¹Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Pimentel, Perú

²Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Chachapoyas, Perú

³Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Trujillo, Perú

Abstract: Currently, the collection and crushing process of fine and coarse aggregate has become costly and transportation time has increased due to the complexity of certain areas in the Peruvian highlands. As a consequence, river aggregate is extracted as a total substitution of fine and coarse aggregate for the preparation of structural concrete, but it is not known for sure if it is totally viable to use this aggregate for the benefit of construction interests. Therefore, the objective of this study is to evaluate the total substitution of fine and coarse aggregate by river aggregate obtained from the city of Cajamarca, Peru, on the mechanical properties of concrete. Concrete specimens were manufactured with fine and coarse aggregate and others with river aggregate from the Huaquillo and Portachuelo quarries, respectively. It is considered the designs of 175 kg/cm² and 210 kg/cm², in addition to tests such as slump, unit weight, compressive strength, flexural strength and an analysis of variance (ANOVA) in Tukey's block. An experimental campaign was carried out with cementitious pastes to evaluate the effect on physical and mechanical properties due to the use of river aggregate; the samples containing fine aggregate and coarse aggregate revealed good results in terms of mechanical properties. However, concrete made with river aggregate meets the minimum required theoretical design strength and is suitable to be used as a total substitute, which is a new and important scientific issue to highlight.

Keywords: coarse aggregate; concrete; fine aggregate; mechanical properties; river aggregate

Efecto de la Sustitución Total del Agregado de Cantera por Agregado de Río en la Resistencia del Concreto

Resumen: Actualmente, la recolección y el proceso de triturado de agregado finos y gruesos, se ha vuelto costoso y ha aumentado el tiempo de transporte por la complejidad de ciertas zonas en la sierra del Perú. Como consecuencia se extrae agregado de río como sustitución total del agregado fino y grueso para la preparación de concreto estructural, desconociendo a ciencia cierta si es totalmente viable utilizar este agregado para beneficio de intereses constructivos. Por lo cual, este estudio tiene como objetivo evaluar la sustitución total del agregado fino y grueso por el agregado de río obtenido de la ciudad de Cajamarca, Perú sobre las propiedades mecánicas del concreto. Se fabricaron probetas de hormigón con árido fino y grueso y otras con árido de río de las canteras Huaquillo y Portachuelo, respectivamente. Se consideraron los diseños de 175 kg/cm² y 210 kg/cm², además ensayos como slump, peso unitario, resistencia a la compresión, flexión y un análisis de varianza (ANOVA) en bloque de Tukey. Se realizó una campaña experimental con pastas cementosas para evaluar el efecto en las propiedades físicas y mecánicas debido al uso de agregado de río, las muestras que contenían agregado fino y agregado grueso revelaron buenos resultados en términos de propiedades mecánicas. Sin embargo, el concreto elaborado con agregado de río cumplen con la resistencia mínima requerida de diseño teórico siendo apta para utilizarse como sustituto total, siendo un tema científico nuevo e importante a destacar.

Palabras clave: árido grueso; hormigón; árido fino; propiedades mecánicas; árido de río

1. INTRODUCTION

Hydraulic concrete is the second most consumed material in the world after water. In the construction industry, it is one of the main elements used to carry out construction works, due to

*mperezsp@ucvvirtual.edu.pe

Recibido: 20/09/2024

Aceptado: 23/06/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.08

CC 4.0

the different properties it can contain, such as resistance, corrosion, durability, etc. (Flores Fernandez et al., 2019; Grinys et al., 2020), being the material that is used in large quantities worldwide (Da Silva et al., 2017). Likewise, fine and coarse aggregates form the skeleton of concrete and generally occupy 60-75 % of the volume (Yaragal et al., 2019). One of the constant and increasingly asked questions is whether the deposits are suitable for preparing concrete (Oliveira et al., 2020). Aggregates can greatly influence the fresh and hardened properties of concrete, in particular by their shape and size characteristics (Güçlüer, 2020). The different mechanical properties mainly depend on the material attributes to make concrete strong and durable (Qing-Xiang et al., 2020). Such that, each professional controls the quality according to his experience (Orozco et al., 2018).

However, in the construction industry (García et al., 2023), the environmental issue should not only be seen by using natural ingredients, but also the recycling of materials from those found on riverbanks or beaches, the use of these materials can reduce costs (Fadzilla Sari et al., 2020). River sediments as aggregate material for concrete production have been investigated by various researchers (Yan et al., 2022). In addition, 30 % of the sediment volume is mainly sand and is easily reusable, for concrete (Beddaa et al., 2020). Nevertheless, in many cases, in order to use this material, it is necessary to transport it from long distances to the source of origin, where prices increase considerably, one of the solutions is that the processed coarse aggregate is replaced by natural granular material (Zega et al., 2006).

This is of increasing concern as this material presents different durability problems, as a result of the passage of time and the interaction with the environment (Solís-Carcaño and Alcocer-Fraga, 2019). Thus, the reuse of river sediments as aggregates becomes a sustainable management technique since it offers the potential to obtain economic benefits by reducing up to 41 % the cost of concrete production (Beddaa et al., 2021). Recap, that the use of natural stone aggregates is especially resilient, as their procurement is net from river beds for concrete production (Tugrul Tunc, 2018). Emphasizing a problem of scarcity of natural aggregate materials, priority is given to the use of river aggregate, which is a mixed material between aggregates and sands. In relation to this, the search for a new source of fine aggregate substitute for the production of concrete, which can be substituted naturally by river granular material is important (Ararsa et al., 2018). Currently, in Peru there are few scientific studies on the use of river aggregate as a total substitute for quarry aggregate, that is a gap existing until today.

While research demonstrates relevant data using river granular material, the findings of Aïssoun et al. (2015) show that concrete produced with crushed stone exhibited a 22-42 % lower surface slump compared to similar concrete made with river aggregate. Additionally, the increase in fines content from 8 to 18 % led to a significant reduction in slump due to the fine particles in the sand aggregate. Mixes made with crushed aggregate had 10 % higher compressive strength at 56 days than those with river aggregate. However, other researchers, Duc-Trong et al. (2022), mentioned that crushed

sand in an optimum amount was 5 to 10% by mass has a favorable effect on the workability and strength of concrete. Likewise, the researchers, Limantara et al. (2017), mention in their findings on the compressive strength test that employing the natural river material, they obtained a value of 19.47 MPa while with a crushed mixture, they obtained a value of 21.12 MPa, respectively at 28 days of curing.

Other research studies according to Eziefula et al. (2020) showed that the compressive strength increased with granite by 38.13 N/mm², river stone by 34.57 N/mm² and local stone by 31.96 N/mm² with the river aggregate being higher than local stone. On the other hand, according to Laserna and Montero (2016), they obtained a 15 % increase in compressive strength for natural river aggregates with a substitution ratio of 100 %, while a decrease of approximately 10-25 % was observed for crushed natural aggregate mixtures. With respect to flexural strength, according to Hachani et al. (2017), they mentioned that the flexural strength increased by 46 % in 28 days compared to concrete with crushed aggregate. Finally, it was concluded that a concrete with pebbles will be better employed in concretes with medium strength or non-structural concrete.

Few studies have been carried out on the total substitution of fine and coarse aggregate from quarries by river aggregate in the concrete mix, presenting a current knowledge gap on the certainty of its adequate use or not in structural concrete. This work contributes on the use of the total substitution of fine and coarse aggregate by river aggregate, in order to reduce the exploitation and overexploitation of aggregate quarries in the highlands of Peru, and on the use that can be given to river aggregate specifically depending on the characteristics of this material. This generates the feasibility of its use for the construction of structural or non-structural elements to the surrounding communities.

2. MATERIALS AND EXPERIMENTAL PROCESS

3.1 Ordinary Portland Cement

Ordinary Portland cement Type I (OPC) - Weight 42.50 kilograms was used to obtain a conventional hydraulic binder without any type of additive. The properties of cement are listed in Table 1.

Table 1. Properties of ordinary Portland cement

Testing	Requeriments	Reference standard
Specific gravity	3.15	ASTM C150
Initial setting	45 minutes	ASTM C191
Final setting	375 minutes	ASTM C191

3.2 Processed aggregate and river aggregate

The aggregates used in the preparation of the concrete were: fine aggregate and coarse aggregate from quarries. The quarry aggregate was obtained from two locations, the first was the Huaquillo quarry and the second the Portachuelo quarry, extracted from the city of San Ignacio, Cajamarca, Peru. The characteristics of the fine and coarse aggregates of the quarries analyzed are shown in Table 2, the granulometric curves of the

river aggregates are shown in Figure 1 and of the quarry aggregate in Figure 2. The granular materials used are shown in Figure 3.

The results do not vary with the quarry aggregates because the river aggregate maintains a heterogeneous mixture, since it was obtained from two different natural quarries, the first A (Huaquillo) located at coordinates E 729 061.48 m; S 9 311 862.87 m, and the second B (Portachuelo) located at coordinates E 727 478.96 m; S 9 435 647.70 m.

Table 2. Physical properties of aggregates

Type of aggregate	Module fineness	Specific gravity	Absorption (%)	Moisture content (%)
Fine - A	3.35	2.163	1.15	1.72
Coarse - A	---	2.685	0.96	0.36
Fine - B	2.85	2.640	1.00	2.13
Coarse - B	---	2.658	2.45	0.39
River - A	4.97	2.691	1.23	0.95
River - B	5.24	2.733	1.19	2.89

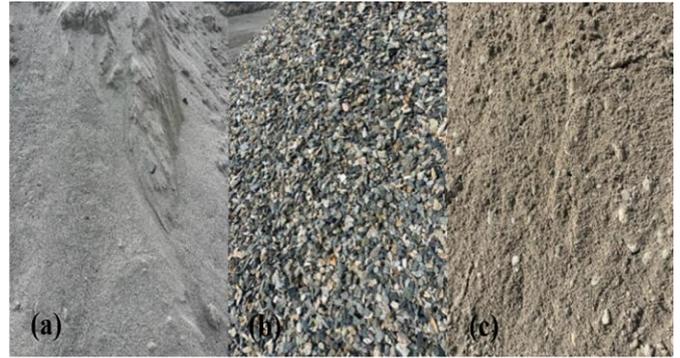


Figure 3. Fine aggregate (a), coarse aggregate (b) and river aggregate (c)

3.3 Fresh state testing

The mixtures were prepared in a laboratory mixer, in a typical procedure, proceeding to the placement of the materials in the mixer, in a total mixing time of 8 minutes. Once the mixing procedure was completed, slump tests were performed using the Abrams cone according to ASTM C143 and on the other hand, the unit weight and air content were measured using the Washington pot according to ASTM C138 and ASTM C231, respectively, and finally the temperature was recorded with a digital thermometer under ASTM C1064.

3.4 Hardened state testing

The compressive strength according to ASTM C39 was performed in cylindrical molds of diameter 150 mm and height of 300 mm and for the flexural test according to ASTM C78 in prismatic molds of width, height and length of 150 x 150 x 550 mm, respectively, the specimens after demolding after 24 hours were immersed under water for test days 7, 14 and 28 days according to the conditions of ASTM C192.

Table 3 shows each description of each representative label for each study design integrating parameters such as study quarry, quarry aggregate (fine aggregate and coarse aggregate), river aggregate and theoretical strength design (F'c).

Table 3. Description of concrete

Labels	Description
T1	F'c: 175 kg/cm ² - Made with quarry aggregate Huaquillo Quarry
T2	F'c: 210 kg/cm ² - Made with quarry aggregate Huaquillo Quarry
T3	F'c: 175 kg/cm ² - Made with river aggregate Huaquillo Quarry
T4	F'c: 210 kg/cm ² - Made with river aggregate Huaquillo Quarry
T5	F'c: 175 kg/cm ² - Made with quarry aggregate Portachuelo Quarry
T6	F'c: 210 kg/cm ² - Made with quarry aggregate Portachuelo Quarry
T7	F'c: 175 kg/cm ² - Made with river aggregate Portachuelo Quarry
T8	F'c: 210 kg/cm ² - Made with river aggregate Portachuelo Quarry

3.5 Concrete mix design

The concrete mix design was carried out under the ACI 211.1 standard, for a design strength of 175 and 210 kg/cm² which used fine aggregate, coarse aggregate and for the mix with treatment the total replacement of 100 % of fine and coarse aggregate by river aggregate considering each study quarry, a water-cement ratio of 0.74 and 0.68 was used, being constant for each design of 175 and 210 kg/cm², respectively, no plasticizer was used, the proportions are shown in Table 4.

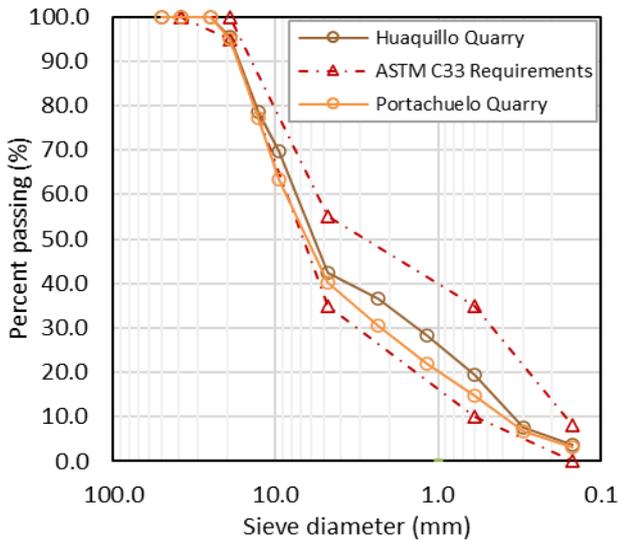


Figure 1. River aggregate particle size distribution curve

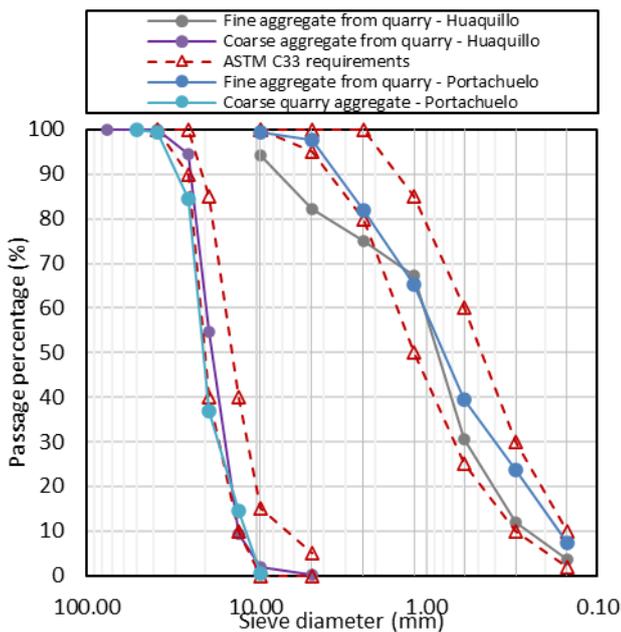


Figure 2. Grain size distribution curve of quarry aggregate

Table 4. Quantities per m³ of each experimental mix design

Labels	Cement (kg/m ³)	River aggregate (kg/m ³)	Fine aggregate (kg/m ³)	Coarse aggregate (kg/m ³)
T1	295	0	1 015	903
T2	367	0	917	905
T3	323	1 864	0	0
T4	389	1 819	0	0
T5	293	0	986	918
T6	368	0	905	933
T7	325	1 902	0	0
T8	388	1 840	0	0

3.6 Statistical model ANOVA

Tukey's block analysis of variance (ANOVA), also known as two-way ANOVA with repeated measures, is an extension of the standard analysis of variance used to compare the means of three or more groups in a repeated-measures or blocked experimental design. This type of experimental design is common in studies in which the same experimental units (subjects, samples, etc.) are subjected to different treatments or conditions at different times or situations.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1 Effect of river aggregate on the slump, unit weight, temperature and air content

As shown in Table 5, the slump test under ASTM C143 considerations had a variation from 3.33 to 5.08 %, which is within the allowable design range of 3 to 4 inches. The unit weight under ASTM C138 considerations is shown to be denser with river aggregate than with fine and coarse aggregate, however, this is not significant when evaluated in the hardened compressive strength test. The test of temperature and air content under ASTM regulatory considerations, it was observed that they oscillate with temperatures not higher than 28 °C, and a variation between each temperature not higher than 1 °C. Meanwhile, the air content shows to be lower with the river aggregate as opposed to the fine and coarse aggregate, this is due to the porosity that the river material must contain, being inversely proportional to the unit weight.

Table 5. Fresh state testing of mix designs

Labels	Slump (Inche)	Unit weight (kg/m ³)	Temperature (°C)	Air content (%)
T1	3.93	2 316.67	26.93	2.30
T2	4.00	2 306.67	27.23	2.37
T3	4.13	2 261.00	26.23	1.97
T4	4.17	2 387.67	27.30	2.13
T5	4.00	2 288.67	27.03	2.33
T6	4.10	2 302.00	27.37	2.43
T7	3.87	2 285.00	27.00	2.07
T8	4.10	2 377.33	27.87	2.17

The slump results obtained in this research are different from the findings of the authors Aissoun et al. (2015), as they mentioned that concrete produced with crushed stone exhibited a surface slump of 22 % to 42 %, lower compared to similar concrete made with rounded coarse aggregate, the increase in fines content from 8 % to 18 % led to a significant reduction in slump due to the fine particles in the sand aggregate. With respect to tests such as unit weight, air content and temperature, there are no records to date, however, there is a not very significant variation of results in the use of fine and coarse aggregate, and samples with the total replacement of these stone materials by river aggregate.

3.2 Effect of river aggregate on compressive strength

Figure 4 shows that the compressive strength considering the replacement of the fine and coarse aggregate by river aggregate, shows to be lower than the conventional aggregate used. This is due to the specific weight of this material, as obtained on the quarries Figure 4(a, b)

Figure 4 (c, d) shows that the specific weight of the aggregate from this quarry (Portachuelo) is lower than the aggregate from the quarry (Huaquillo) in Figure 4 (a, b), which affects the strength, this is predominant with a higher strength with the fine and coarse aggregate up to 4.39 and 7.66 % over the river aggregate for the 175 and 280 strength designs, respectively.

The results obtained differ from those found in other studies. For example, Laserna and Montero (2016) obtained an increase of 15 % in compressive strength for natural river aggregates with a substitution ratio of 100%, while a decrease of approximately 10-25 % was observed for mixtures of crushed natural aggregates. The resistances are not significantly reduced, due to the fact that the composition of the river aggregate compared to the conventional aggregate predominates the granulometric distribution, so the best gradation presents a homogeneity in the mixture and also the texture of the aggregate is vital for the adherence that it opts for with its binders against internal stresses.

3.3 Effect of river aggregate on flexural strength

As shown in Figure 5, the results of the flexural strength are affected with the total replacement of the fine and coarse aggregate with river aggregate. However, even with total replacement, the minimum resistance of the modulus of rupture is maintained as specified in equation 1, where $f'c$ (kg/cm²) for the flexural strength.

$$2.50 \sqrt{f'c} \quad (1)$$

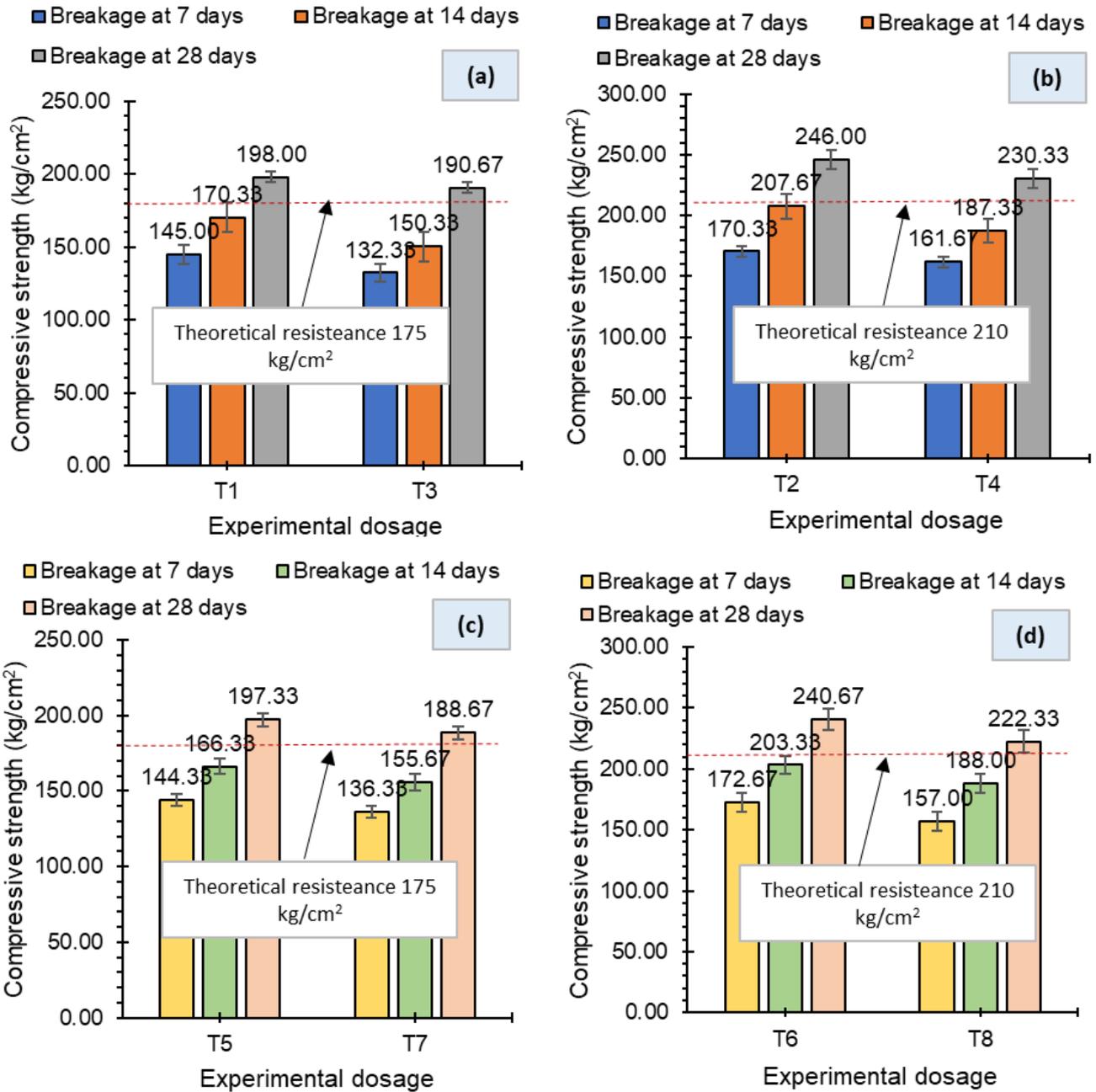


Figure 4. Compressive strength results Portachuelo Quarry (a and b); Huaquillo Quarry (c and d)

Showing to be within the minimum required normative parameters, since with respect to the minimum required resistance between 1 to 5 kg/cm² above this for using river aggregate from both study quarries.

Against these results were compared and disagreed, as stipulated by the researchers Hachani et al. (2017), where they mentioned that the flexural strength increased by 45 % to 46 % in 7 and 28 days, unlike the concrete made with crushed aggregate, finally it was concluded that a concrete with

pebbles will be better employed in concretes with medium strength or non-structural concrete.

3.1 Statistical analysis ANOVA

According to Figure 6(a), corresponding to the variable compressive strength of design 175, the ANOVA test with blocks, presented a p-value of significance greater than 0.05 ($p = 0.0549 > 0.05$), i.e. there is no significant difference between treatments T5 and T7, as well as the post hoc Tukey's multiple comparisons test, showed equal letters on the box and whiskers diagrams (letter "a" in both boxes).

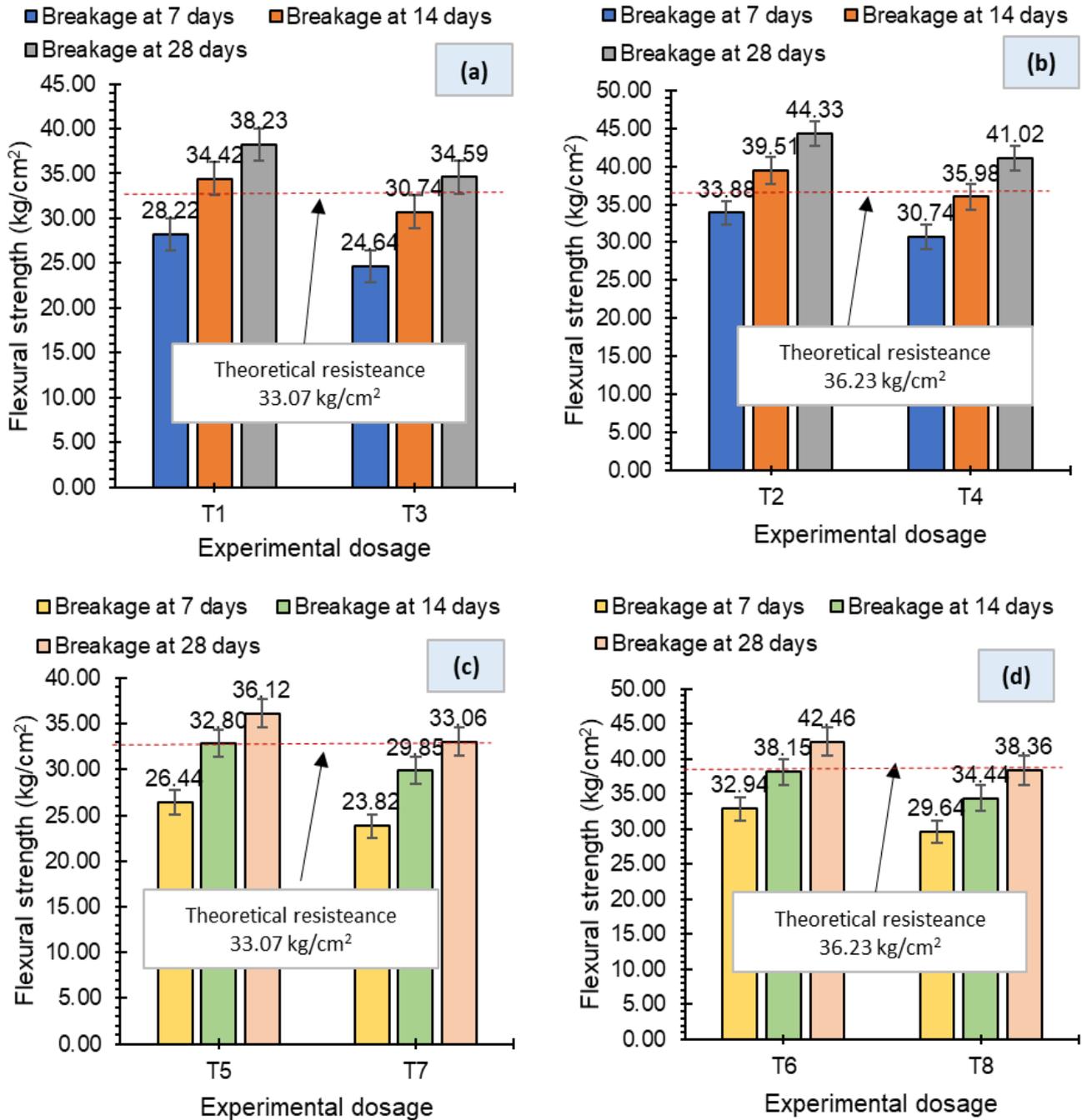


Figure 5. Flexural strength results Portachuelo Quarry (a and b); Huaquillo Quarry (c and d)

Figure 6(b), in reference to the variable design compressive strength 210, the p-value of significance of the ANOVA test in blocks, presented a value less than 0.05 ($p = 0.00213 < 0.05$), i.e., we can affirm that there is a significant difference between treatments T6 and T8, this affirmation can be supported with the Tukey multiple comparisons test, where both box plots show different letters, being treatment T6 the one that presented the significantly higher compressive strength, reaching a sample mean compressive strength of 243.33 kg/cm².

Figure 6(c), in reference to the flexural strength variable of design 175, the p-value of significance of the ANOVA test in blocks, resulted to be less than 0.05 ($p = 0.000903 < 0.05$). That is to say, there is a significant difference between treatments T5 and T7, also the Tukey Post Hoc test, allowed us to support establishing different letters on the box plots, finding that treatment T5, was where the significantly higher flexural strength was recorded, finding a sample average flexural strength equal to 37.18 kg/cm².

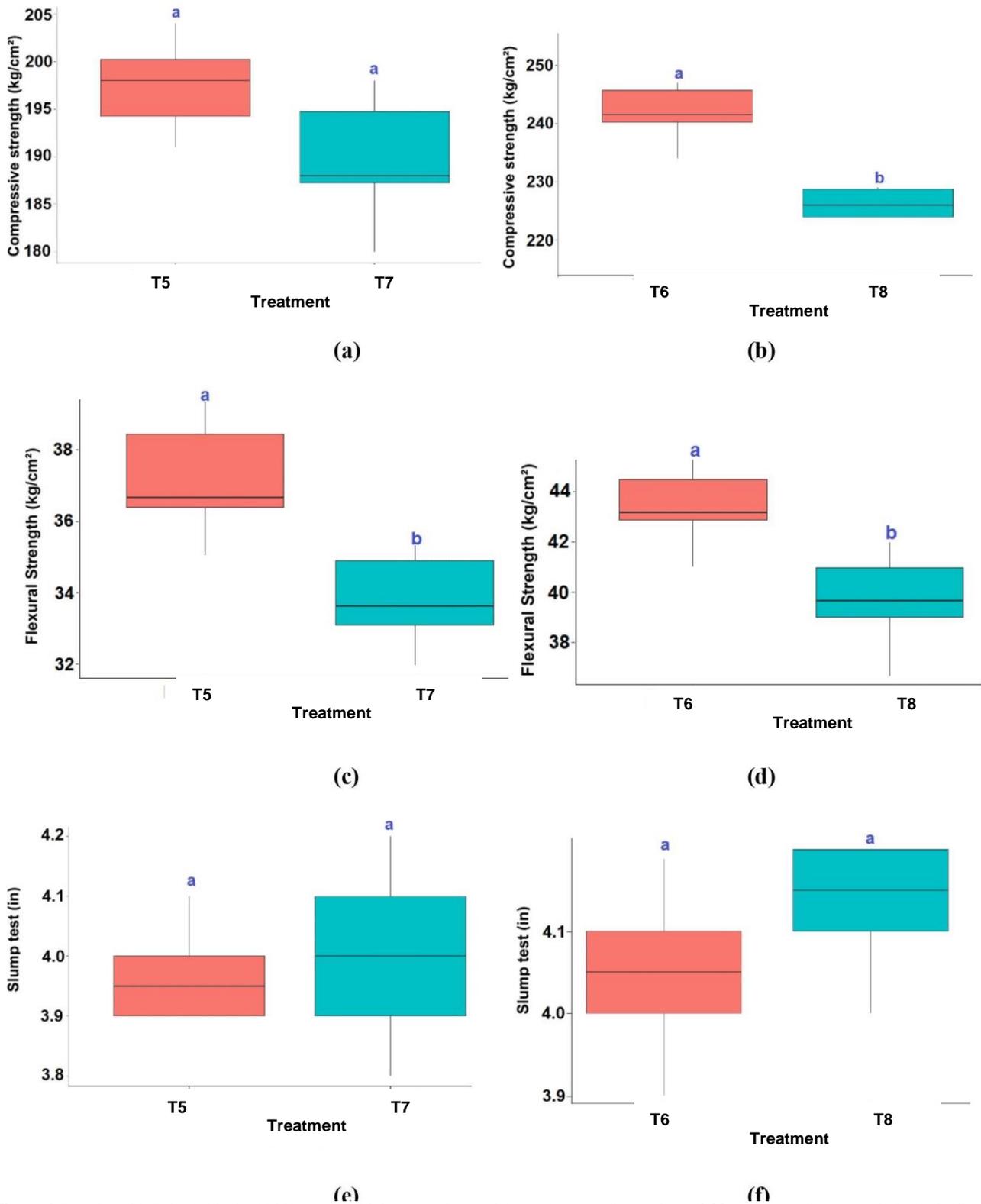


Figure 6. Boxplot with Tukey's block ANOVA and multiple comparisons of the study: according to the variable's compressive strength (kg/cm²), flexural strength (kg/cm²) and slump test (in) for each corresponding design.

In Figure 6(d), a significant difference was also found between treatments T6 and T8, because the p-value of significance of the ANOVA test in blocks was less than 0.05 ($p = 0.000683 < 0.05$), likewise, Tukey's multiple comparisons test showed that the treatment that maximized the flexural strength variable was

treatment T6, reaching an average sample tensile strength of 43.40 kg/cm².

In Figure 6(e), the slump test variable of design 175, we can affirm that there is no significant difference between treatments T5 and T7, because the p-value of significance of

the ANOVA test in blocks presented a value greater than 0.05 ($p = 0.634 > 0.05$), and the p-value of significance of the ANOVA test in blocks presented a value greater than 0.05 ($p = 0.634 > 0.05$), as well as equal letters are observed above the box and whisker diagrams supporting the Tukey's multiple comparisons test.

Finally, in Figure 6(f), no significant difference was visualized between treatments T6 and T8 in reference to the variable settling test of design 210, where a p-value of significance greater than 0.05 ($p = 0.177 > 0.05$) was found, as well as equal letters in the box and whiskers diagrams, which were assigned by Tukey's multiple comparisons test.

4. CONCLUSIONS

The study shows that river aggregate significantly influences the mechanical properties of concrete by totally replacing the fine and coarse aggregate in the preparation of concrete for structural purposes, which leads to the following conclusions to be considered:

This study on the effect of river aggregate in total replacement of the processed aggregate (fine and coarse aggregate), showed reliable results on the effect of river aggregate on the design strengths of 175 and 210 kg/cm², respectively.

It was observed that with river aggregate from the Huaquillo and Portachuelo quarries, the compressive strength was lower between 3.7 % and 4.39 % and between 6.38 % and 7.62 %, corresponding to 175 kg/cm² and 210 kg/cm² respectively.

It was observed that with river aggregate from the Huaquillo and Portachuelo quarries, the flexural strength was reduced between 8.47 % and 9.51 % and between 7.47% and 9.66 %, corresponding to the strength of 175 kg/cm² and 210 kg/cm² respectively.

It is concluded that it is feasible to use river aggregate for the elaboration of structural concrete, totally substituting the independent processed aggregates over the fine and coarse aggregates, since it presented values above the theoretical design resistances.

Consider that the results obtained include certain characteristics of aggregates belonging to the highlands of Peru, which is not an indicator that can be used in different areas of the country itself or abroad, as it should be analyzed in the respective tests per location.

In addition, further studies on aggregates such as X-ray diffraction, to determine the chemical and mineralogical composition and its direct or indirect influence on the strength of concrete, as well as chemical tests, are recommended.

REFERENCES

- Aïssoun, B. M., Soo-Duck, H., & Kamal, K. H. (2015). Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. *Materials and Structures*, 49(1-2), 597 - 609. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0522-9>
- Ararsa, W., Tucay Quezon, E., & Aboneh, A. (2018). Suitability of Ambo Sandstone Fine Aggregate as an Alternative River Sand Replacement in Normal Concrete Production. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(4), 140-146. <https://doi.org/10.12691/ajcea-6-4-2>
- Beddaa, H., Fraj, A. B., & Ducléroi, S. (2021). Experimental study on river sediment incorporation in concrete as a full aggregate replacement: Technical feasibility and economic viability. *Construction and Building Materials*, 313, 125425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125425>
- Beddaa, H., Ouazi, I., Ben Fraj, A., Lavergne, F., & Torrenti, J.-M. (2020). Reuse potential of dredged river sediments in concrete: Effect of sediment variability. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121665>
- Da Silva, M., Pepe, D. S., Mende de Andrade, R., Shubert Pfeil, M., & Toledo Filho, R. (2017). Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 606-618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.030>
- Duc-Trong, N., Duy-Liem, N., & MyNgoc-Tra, L. (2022). An experimental investigation on the utilization of crushed sand in improving workability and mechanical resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 326, 126766. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126766>
- Eziefula, U. G., Opara, H. E., & Eziefula, B. I. (2020). Strength of concrete produced with different sources of aggregates from selected parts of Abia and Imo States of Nigeria. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(5), 1053 - 1061. <https://doi.org/10.1108/JEDT-08-2019-0220>
- Fadzilla Sari, F., Limantara, A. D., Ridwan, A., Gardjito, E., Subiyanto, B., Sudarmanto, H., . . . Wiwoho Mudjanarko, S. (2020). Laboratory Testing on The Standard Mixed Designed Paving with Bamboo Material as Smooth and Rough Aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 498, pp. 1-8. Jawa Timur, Indonesia: IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/498/1/012032>
- Flores Fernández, A. M., Villafranca Castillo, A. J., & Reconco Amaya, J. A. (2019). Concrete with recycled aggregate: a construction material option with sustainability criteria. *Unitec*, 8, 120-124. <https://doi.org/10.5377/innovare.v8i2.9023>
- García, J., Arriola, G., Villena, L., Muñoz, S. (2023). Strength of Concrete Using Partial Addition of Residual Wood Ash with Respect to Cement. *Revista Politécnica*, 52(1). 45-54. <https://doi.org/10.33333/rp.vol52n1.05>
- Grinys, A., Augonis, A., Daukšys, M., & Pupeiki, D. (2020). Mechanical properties and durability of rubberized and SBR latex modified rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 248, 118584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118584>
- Güçlüer, K. (2020). Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive. *Journal of Building*

Engineering, 27, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100949>

- Hachani, M. I., Kriker, A., & Seghiri, M. (2017). Experimental study and comparison between the use of natural and artificial coarse aggregate in concrete mixture. *Energy Procedia*, 119, 182-191.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.067>
- Laserna, S., & Montero, J. (2016). Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties. *Construction and Building Materials*, 115, 78-86.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.037>
- Limantara, A. D., Widodo, A., Winarto, S., Krisnawati, L. D., & Mudjanarko, S. W. (2017). Optimizing the use of natural gravel Brantas river as normal concrete mixed with quality $f_c = 19.3$ Mpa. 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering for Sustainability, IConCEES 2017. Langkawi.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012104>
- Oliveira, M. A., Scotto, M. G., Barbosa, S., Freire de Andrade, C., & Freitas, M. d. (2020). Morphological controls and statistical modelling of boulder transport by extreme storms. *Marine Geology*, 426, 16.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106216>
- Orozco, M., Avila, Y., Restrepo, S., & Parody, A. (2018). Influencing factors in concrete quality: a survey of relevant actors in the concrete industry. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33, 161-172.
<https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000200161>
- Qing-Xiang, M., Dandan, L., & Yang, L. (2020). Mesoscale computational modeling of concrete-like particle-reinforced composites with non-convex aggregates. *Computers & Structures*, 240, 106349.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2020.106349>
- Solís-Carcaño, R. G., & Alcocer-Fraga, M. A. (2019). Durability of concrete with high absorption aggregates. *Engineering, Research and Technology*, 20, 1-13.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039>
- Tugrul Tunc, E. (2018). Strength Properties of Hardened Concrete Produced with Natural Aggregates for Different Water/Cement Ratios. *European Journal of Science and Technology*, 14, 280 - 287.
<https://doi.org/10.31590/ejosat.486093>
- Yan, J., Zhong, S., Chen, S., Lv, Y., Yang, L., Peng, G., & Deng, A. (2022). Study on the Application of Sediment-Based Embankment Building and Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Preparation in the Resource Utilization of Yellow River Sediment. *Materials*, 15, 5668.
<https://doi.org/10.3390/ma15165668>
- Yaragal, S. C., Basavana, G., & Rajasekaran, C. (2019). Characterization and performance of processed lateritic fine aggregates in cement mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 200, 10-25.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.072>
- Zega, C. J., Taus, V. L., & Di Maio, A. A. (2006). Physico-mechanical behavior of recycled concretes made with pebbles. *Technical Bulletin*, 44, 17-26. Retrieved September 10, 2023, http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2006000300003&lng=es&tlng=

BIOGRAPHIES



concrete.

Paul Mauricio, Monje Yovera, Civil Engineer from Universidad Señor de Sipán, with experience in the development of road infrastructure projects, reinforced concrete and others. Studies of reinforced concrete specialization programs with the use of specialized software and studies on the quality of



concrete.

Socrates Pedro, Muñoz Perez, Civil Engineer graduated from the Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo - Lambayeque in 2006, with 11 years of experience in execution of civil works and production of precast and prestressed and 16 years of collegiate, with a Master's degree in Earth Sciences with mention in Geotechnics from the Universidad Nacional de San Agustín - Arequipa, Doctor in Civil Engineering from the Universidad Nacional del Santa. My main values are loyalty, responsibility, companionship, punctuality and the desire to excel. Former undergraduate professor in the courses of Soil Mechanics, Fluid Mechanics, Geology at Universidad Católica San Pablo, Universidad Nestor Cáceres Velásquez, Universidad Alas Peruanas, Former Postgraduate Professor at Universidad Nestor Cáceres Velásquez in the course of Soil and Rock Mechanics, Professor at Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza.



Luigi Italo, Villena Zapata, Statistical Engineer from the National University of Trujillo, Master in Education with mention in higher education didactics from the Universidad Privada Antenor Orrego and doctoral candidate in statistics and mathematics at the Universidad Nacional del Santa. As work experience I have been head of the Statistics Unit of the Bagua Support Hospital "Gustavo Lanatta Lujan", I have worked in the Statistics and Informatics Unit and Epidemiology Unit - Regional Health Management La Libertad. Teaching experience in universities and author of books and articles in indexed journals Scopus and Web of Science.



Juan Martín, García Chumacero, Civil Engineer from the Universidad Señor de Sipán, studying a Master's Degree in Geology at the Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Peru. Engineer dedicated to the area of research as a consultant and researcher in different branches of civil engineering such as

concrete technology, roads and soil and slope stability, seismic analysis of structures among other areas, experience in writing research reports, scientific and review articles, contribution as a reviewer of a scientific article of the Journal Faculty of Engineering-University of Antioquia. Experience in supervision of educational infrastructure works and real estate projects at national level.



José Luis, Quispe Osorio Degree in Physics, graduated from the National University of Trujillo. Full-time Associate Professor at the Faculty of Civil and Environmental Engineering (FICIAM) of the Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Experienced in thesis advising in the field of applied physics.



Edwin Adolfo, Díaz Ortiz, Civil engineer, specialist in environmental management. PhD in Science and Engineering. With experience in the elaboration of environmental management instruments and in diverse engineering projects as a consultant and construction supervisor. University professor in the

field of soil mechanics, road works, construction supervision, construction quality, management and administration of civil projects and scientific research projects.

Uso de Minimización Irrestrita de una Función Espectral para Estimar la Zona Visible en Matlab 19.0

Quispe, Reynaldo^{1*} ; Juli, Verónica² 

¹Universidad Nacional José María Arguedas, Departamento Académico de Ciencias Básicas, Andahuaylas, Perú.

²Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Departamento Académico de Física, Arequipa, Perú.

Resumen: Debido a la simplicidad y amplia aplicabilidad, la minimización irrestrita en la zona visible (Vis) es una herramienta importante para resolver muchos problemas de optimización de parámetros y condiciones operativas de sistemas fotovoltaicos. El propósito de este trabajo es usar la minimización irrestrita de una función objetivo simplificada ζ para estimar la zona Vis. Utilizamos el método cuantitativo y técnica documental, con una muestra de 34 datos experimentales Vis de la estación de la Universidad Heredia. Se utilizó el Software Matlab 19.0 y se aplicó el método paramétrico: minimización de un modelo matemático mediante el algoritmo básico con corrección de Armijo mediante el backtracking. El resultado obtenido es un optimizador factible de ζ en 33 iteraciones, la cual determinó un modelo de transferencia de la zona Vis de turbidez por aerosoles (β) $3,69 \times 10^{-2}$ y capa de ozono (l) $57,40 \times 10^{-2}$ cm con parámetros estadísticos de incertidumbre 0,132%, 2,066% para el error de sesgo medio relativo (rMBE) y error cuadrático medio relativo (rRMSE) respectivamente. Se concluyó que la atmósfera de la Universidad Heredia presenta un cielo blanco alternado turbio sin agujero de ozono.

Palabras clave: Turbidez por aerosoles, función espectral, corrección de Armijo, zona Vis, minimización irrestrita

Use of Unrestricted Minimization of a Spectral Function to Estimate the Visible Zone in Matlab 19.0

Abstract: Due to the simplicity and wide applicability, unrestricted minimization in the visible zone (Vis) is an important tool to solve many optimization problems of parameters and operating conditions of photovoltaic systems. The purpose of this work is to use unrestricted minimization of a simplified objective function ξ to estimate the Vis zone. We used a quantitative method and a documentary technique, analyzing a sample of 34 Vis experimental data from the Heredia University station. The parametric method was applied by means of the Matlab 19.0 Software, specifically through the minimization of a mathematical model employing the basic algorithm with Armijo correction using backtracking. The result obtained is a feasible optimizer of ξ in 33 iterations, which determined a transfer model of the Vis zone of aerosol turbidity (β) 3.69×10^{-2} and ozone layer (l) 57.40×10^{-2} cm with statistical parameters of uncertainty 0.132%, 2.066% for the relative mean bias error (rMBE) and relative root mean square error (rRMSE) respectively. It is concluded that the atmosphere of the Heredia University presents a cloudy alternating white sky without an ozone hole.

Keywords: Aerosol turbidity, spectral function, Armijo correction, Vis zone, unrestricted minimization

1. INTRODUCCIÓN

La minimización irrestrita desempeña un papel crucial en la Zona Vis, especialmente en la optimización de sistemas de energía integrados híbridos que combinan fuentes de energía eólica, solar y térmica. En este contexto, se utiliza para ajustar los parámetros del sistema y maximizar la producción de energía mientras se minimizan los costos operativos (Cox et al., 2023). Además, es fundamental en la extracción precisa de

parámetros de modelos fotovoltaicos (Farag et al., 2023), lo que mejora la capacidad de prever el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en diversas condiciones (Paixão et al., 2023). En este trabajo, planteamos el método de minimización irrestrita de una función espectral no lineal de restricciones de desigualdad basada en mediciones de radiación Vis y un modelo de transferencia de radiación Vis, para calcular el coeficiente de turbidez atmosférica por aerosoles de la zona Vis.

*rrquispe@unajma.edu.pe

Recibido: 22/11/2023

Aceptado: 24/07/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.09

CC 4.0

1.1 Antecedentes

Debido a la naturaleza computacional de la resolución de problemas de minimización, se revisaron los métodos iterativos: descenso de gradiente, Newton-Raphson y el gradiente conjugado de Fletcher-Reeves para la optimización sin restricciones utilizando dos funciones que pertenecen a una clase de funciones de Rosenbrock (Aliyeva et al., 2022). Para resolver los problemas de programación cuadrática (QPP), se propuso un lagrangiano implícito para la clasificación a través de un problema de minimización convexo sin restricciones. Las soluciones a las variables duales se obtienen utilizando esquemas iterativos de enfoques de aproximación suave que contienen funciones no diferenciables (Emiola & Adem, 2021).

Si la función objetivo no es cercana a una cuadrática, la dirección de búsqueda es generada por un modelo cónico bajo condiciones apropiadas que posee la propiedad de descenso suficiente en el que la dirección de búsqueda es calculada minimizando un modelo aproximado seleccionado en un subespacio bidimensional (Borah & Gupta, 2020). La tasa de convergencia del subespacio gradiente de rango constante obtiene convergencia más rápida mediante un parámetro que controla el decaimiento de la norma de gradiente para funciones convexas y de Lipschitz, en comparación a versiones conocidas de descenso de gradiente ruidoso (estocástico) (Li et al., 2019).

La formulación de un problema de optimización sin restricciones tiene como objetivo minimizar la probabilidad de interrupción en las comunicaciones bidireccionales, con respecto a la ubicación del relé y asignación de tiempo para la recolección de energía. Además, se observa como la tasa objetivo de transmisión influye en la probabilidad de interrupción y eficiencia espectral del sistema de comunicación que utiliza el protocolo híbrido de retransmisión de conmutación de potencia y tiempo (Kairouz et al., 2020). Un problema de minimización sin restricciones "diferenciable" (problema de mínimos cuadrados) está asociado con un sistema de ecuaciones no lineales, con función objetivo, basada en la norma, y resuelta mediante la minimización de la suma de los cuadrados de los residuos. Asimismo, subgradientes iterativos de la función objetivo es calculada mediante problemas de minimización sin restricciones, para la resolución de los problemas asociados (Ghosh et al., 2019).

Cuando la restricción de la función objetivo en el camino de búsqueda proyectada no es diferenciable. Se proponen los métodos de conjunto activo de aproximación cuasi-Newton y de punto interior primal dual para la búsqueda de línea cuasi-Wolfe sustancialmente eficiente y confiable (Stefanov, 2021).

La zona Vis es de vital importancia en la búsqueda de material fototérmico rentable, el diseño de una tela de almacenamiento solar visible, logra una alta eficiencia energética de liberación de calor (83 °C) de aproximadamente 4,8% bajo la luz solar, lo que puede proteger el cuerpo humano de lesiones por frío causadas por un brazalete autocalentable (Fei et al., 2021). En la región Vis 430 ~ 627 THz, un metamaterial absorbente

(MA) muestra una absorptividad superior al 80%, mejorando la eficiencia de las células solares, esto debido a la movilidad de fotones significativos de conversión y absorción que pueden integrarse a la tecnología de células solares (Hoque & Islam, 2020).

A causa de la región visible, el espectro polarímetro visible del Telescopio Solar Daniel K. Inouye (DKIST) es capaz de observar regiones solares de hasta un área de 120×78 arcsec² dentro del rango de 380 a 900 nm del espectro solar, lo que permite realizar estudios espectro polarimétricos bien establecidos de la estructura magnética y la dinámica del plasma de la atmósfera solar, así como investigaciones completamente novedosas del espectro solar (de Wijn et al., 2022). En la teledetección satelital, el trayecto de un rayo de radiación Vis desde el Sol hasta el objetivo (superficies terrestres o marinas) y el sensor se ven fuertemente afectados por la presencia de la atmósfera (Basith et al., 2019).

Para desarrollar un modelo de zona de banda ancha Vis, es necesario herramientas de medición para recopilar datos y técnicas de modelado para simulaciones de la radiación de longitudes de onda larga (Di Pietro, 2022). Sin embargo, debido a las incertidumbres de sus cálculos se necesitan saber sobre cómo los cambios de Vis afectarían a los seres humanos y ecosistemas. El modelo de atenuación de los componentes rojo, verde y azul (RGB) de la radiación solar Vis, determinó que los coeficientes de atenuación promedio tienden a la unidad en el rango, desde la dispersión de Rayleigh hasta la dispersión de la luz en una niebla intensa de una atmósfera contaminada (Aliyeva, et al., 2022). La naturaleza estocástica de la radiación solar Vis hace que esta sea difícil de modelar dificultando su fiabilidad mediante una metodología robusta y fácil de usar para simular Vis se podría determinar un modelo solar capaz de evaluar un sistema de energía integrado con energía solar (Abunima et al., 2019).

Por otro parte, un buen conocimiento del parámetro de atenuación de la radiación Vis, turbidez atmosférica por aerosoles permitió explicar la histórica erupción volcánica del Monte Pinatubo (1991), el Niño (1998), un evento de humo de biomasa sin precedentes (1998) y la Niña que causó la sequía más severa registrada en la historia de Texas (2011) (Mims, 2022).

1.2 Importancia de la Minimización Irrestringida

El método de minimización irrestringida de funciones es fundamental en numerosas áreas de investigación y aplicación como el diseño de dispositivos fototérmicos avanzados, la minimización de costos (Upadhyay et al., 2019), detección de objetos en un entorno sin restricciones, minimización de circuitos (Ilango et al., 2020), diseño óptimo de un cuantificador polar no restringido (Wu & Dumitrescu, 2020), el problema de ubicación de instalaciones distribuidas (Filos-Ratsikas et al., 2023), aprendizaje de clasificadores de la Red de Markov (MN) sin restricciones (Franc et al., 2021), sistema de estacionamiento que hace que el movimiento de los vehículos en movimiento sea irrestringido (Manoharan et al., 2021), informática distribuida (Drozdowski & Shakhlevich,

2021), el problema de ubicar instalaciones desagradables (Alamatsaz et al., 2021), etc.

1.3 Relación de la minimización irrestrita y la Zona Vis: Aplicaciones y Relevancia

Los métodos de minimización irrestrita permiten hacer visible información oculta en los datos de condiciones óptimas, lo que posibilita así una mejor comprensión y manipulación de los sistemas fotovoltaicos (PV) (Duan et al., 2023). La zona Vis representa el rango de parámetros y condiciones en el que se puede operar eficazmente un PV, mientras que la minimización irrestrita permite explorar y optimizar este espacio de manera eficiente.

Se propone la aplicación de un algoritmo novedoso y eficiente, basado en el flujo turbulento de optimización a base de agua para resolver problemas de flujo de potencia óptimo en redes de energía con energía solar fotovoltaica y unidades de turbina eólica. La minimización irrestrita juega un papel importante en la determinación de las configuraciones óptimas de la red de energía, mientras que la Zona Vis se refiere a las restricciones y consideraciones sobre la generación de energía solar y eólica en ubicaciones específicas (Alghamdi, 2023).

La extracción de parámetros de modelos fotovoltaicos presenta algoritmos de optimización avanzados. La minimización irrestrita se aplica en la búsqueda de los parámetros óptimos del modelo, mientras que la Zona Vis influye en la generación de datos de entrada del modelo, como la irradiancia solar y la velocidad del viento (Eslami et al., 2022).

El desarrollo de un modelo de programación para optimizar la energía de una concentración de energía solar de un sistema fotovoltaico (PV). La minimización irrestrita se utiliza para maximizar las ganancias y determinar un calendario de energía rentable, mientras que la Zona Vis se refiere a las fluctuaciones en la disponibilidad de energía solar y eólica a lo largo del tiempo (Hamilton et al., 2020).

La propuesta de un modelo de soporte vectorial no lineal con una función de penalización estricta para pronosticar la radiación solar. Aquí, la minimización irrestrita se aplica en la optimización de los parámetros del modelo para mejorar la precisión del pronóstico, mientras que la Zona Vis se refiere a la variabilidad en la radiación solar, influenciada por factores meteorológicos (Jiang & Dong, 2016).

Estos estudios demuestran la importancia de considerar tanto los aspectos de optimización como las características específicas del entorno, como la disponibilidad de recursos solares y eólicos, en el diseño y la operación de sistemas de energía renovable.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo de transferencia de la zona Vis

El modelo físico de intensidad de radiación Vis (i_λ) en ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) para longitudes de onda (λ) en la zona $0,445 \mu\text{m} \leq \lambda \leq$

$0,610 \mu\text{m}$ atenuada que llega directamente a la superficie de la Tierra, considera rayos monocromáticos extraterrestres (i_o) en ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$) incidentes sobre la atmósfera alta, que varían debido a que esta capa está compuesta de aerosoles, ozono y vapor de agua distribuidos irregularmente en todo su volumen, produciendo efectos simultáneos combinados de transmitancias independientes (vea la Ecuación 1) de dispersión Rayleigh (t_r), absorción por ozono (t_o), aerosoles (t_a) y vapor de agua (t_w) (Lisenko, 2018).

$$i_\lambda(\lambda, l, \beta, w) = (r/r_o)^2 i_o(\lambda) t_r t_o t_a t_w \quad (1)$$

Donde:

$r_o = 1.496 \times 10^8$ km, es la distancia media Sol-Tierra, r es el radio de órbita elíptica de la Tierra alrededor del Sol, en uno de sus focos (Stutzmann & Csoklich, 2022) y d es el número del día,

$$(r/r_o)^2 = [1 + 0.033 \cos(2\pi d/365)]^2 \quad (2)$$

La masa de aire relativa m_r , en función del ángulo cenital solar θ_z en grados (Bai & Zong, 2021) es:

$$m_r = [\cos \theta_z + 0.15(93,885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (\text{Bosca Berga, 1995}). \quad (3)$$

La masa de ozono m_o , en función de la altura $h_o = 22$ km donde se da la máxima concentración de ozono es:

$$m_o = [(1 + h_o/6370)^{-1} / (\cos^2 \theta_z + 2h_o/6370)^{0.5}] \quad (4)$$

La masa de aire m_a , en función de la presión estándar $P_o = 1,013$ mb y la presión local P en mb,

$$m_a = m_r P / P_o \quad (\text{Lefèvre et al., 2013}). \quad (5)$$

Además,

$$t_\lambda(\lambda, m_a) = \exp(-m_a / [\lambda^4(115,641 - 1,335\lambda^{-2})]) \quad (6)$$

es llamada dispersión Rayleigh (Gueymard & Kambezidis, 2004),

$$t_{\lambda_o}(k_{\lambda_o}, l, m_o) = \exp(-k_{\lambda_o} l m_o) \quad (\text{Zo et al., 2014}), \quad (7)$$

siendo k_{λ_o} el coeficiente de absorción de ozono en cm^{-1} , l el espesor de ozono en cm,

$$t_{\lambda_a}(\lambda, \beta, m_a) = \exp(-\lambda^{-\alpha} \beta m_a) \quad (\text{Costa et al., 2012}), \quad (8)$$

siendo β el coeficiente de turbidez por aerosoles sin unidades, $\alpha = 102,74 \times 10^{-2}$ para $\lambda < 0,5 \mu\text{m}$ y $\alpha = 1,206$ para $\lambda > 0,5 \mu\text{m}$, $k_a \lambda$ el coeficiente de absorción por aerosoles dada en cm^{-1} ,

$t_{\lambda_w}(w, k_{\lambda_w}, m_r) = \exp[-23,85 \times 10^{-2} w k_{\lambda_w} m_r / (1 + 20,07 w k_{\lambda_w} m_r)^{0,45}] \quad (9)$ siendo w el vapor de agua precipitable en cm y k_{λ_w} el coeficiente de absorción de vapor de agua sin unidades (Iqbal, 1983).

2.2 Tipo de atmósfera

Podemos clasificar a la atmósfera de acuerdo con la cantidad de pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire cuyos tamaños están comprendidos entre $0,002$ y $100 \mu\text{m}$ de radio, pueden ser de procedencia terrestre (humos, polen, cenizas de erupciones volcánicas, incendios forestales, combustión de carbón, polvo, arena de tormentas, etc.) o de procedencia marina (cristales de sal, núcleos de sales higroscópicas en los que condensa el agua, aerosoles oceánicos) (Zakinyan & Zakinyan, 2023) y su distribución es determinada por el valor de β como muestra la Figura 1.

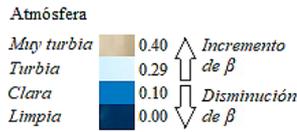


Figura 1. Grado de contaminación de una atmósfera (Wen et al., 2023)

2.3 Datos de investigación

Este trabajo fue realizado en los laboratorios del Departamento Académico de Ciencias Básicas de la Universidad Nacional José María Arguedas en Andahuaylas del Perú en condiciones reguladas.

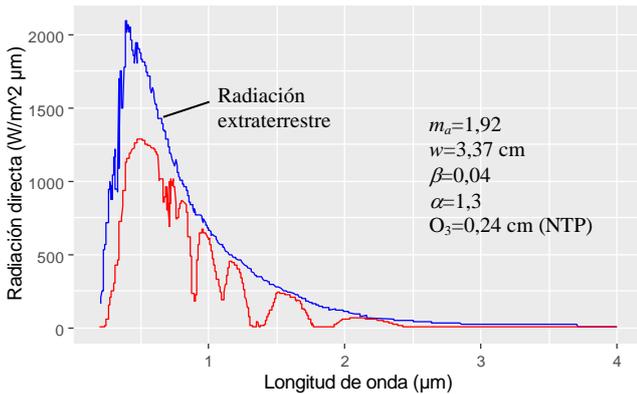


Figura 2. Banda espectral solar extraterrestre i_{λ_0} e incidente directa atenuada i_{λ_e} sobre la superficie terrestre (Wright, 2003)

Tabla 1. Datos experimentales de i_{λ_0} , i_{λ_e} (Wright, 2003), k_{λ_0} y k_{λ_w} (Iqbal, 1983)

λ (μm)	$i_{\lambda_0}(\lambda)$ ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)	i_{λ_e} ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)	k_{λ_0} (cm^{-1})	k_{λ_w}
0,450	208,852x10 ¹	103,261x10 ¹	0,003	0
0,450	203,469x10 ¹	114,130x10 ¹	0,003	0
0,455	201,316x10 ¹	115,217x10 ¹	0,004	0
0,460	200,239x10 ¹	117,391x10 ¹	0,006	0
0,465	199,163x10 ¹	118,478x10 ¹	0,008	0
0,470	198,086x10 ¹	119,565x10 ¹	0,009	0
0,475	194,856x10 ¹	119,565x10 ¹	0,012	0
0,480	192,703x10 ¹	120,652x10 ¹	0,014	0
0,485	190,550x10 ¹	122,826x10 ¹	0,021	0
0,490	192,703x10 ¹	122,826x10 ¹	0,021	0
0,495	191,627x10 ¹	123,913x10 ¹	0,025	0
0,500	192,703x10 ¹	125,000x10 ¹	0,030	0
0,505	189,474x10 ¹	126,087x10 ¹	0,035	0
0,510	187,321x10 ¹	127,174x10 ¹	0,040	0
0,515	190,550x10 ¹	127,174x10 ¹	0,045	0
0,520	186,244x10 ¹	128,261x10 ¹	0,048	0
0,525	181,938x10 ¹	129,348x10 ¹	0,057	0
0,530	188,397x10 ¹	130,435x10 ¹	0,063	0
0,535	190,550x10 ¹	130,435x10 ¹	0,070	0
0,540	189,474x10 ¹	130,435x10 ¹	0,075	0
0,545	188,397x10 ¹	129,348x10 ¹	0,080	0
0,550	187,321x10 ¹	129,348x10 ¹	0,085	0
0,555	188,397x10 ¹	129,348x10 ¹	0,095	0
0,560	185,167x10 ¹	128,261x10 ¹	0,103	0
0,565	183,014x10 ¹	128,261x10 ¹	0,110	0
0,570	184,091x10 ¹	128,261x10 ¹	0,120	0
0,575	181,938x10 ¹	127,174x10 ¹	0,122	0
0,580	179,785x10 ¹	127,174x10 ¹	0,120	0
0,585	178,708x10 ¹	128,261x10 ¹	0,118	0
0,590	177,632x10 ¹	127,174x10 ¹	0,115	0
0,595	175,478x10 ¹	126,087x10 ¹	0,120	0
0,600	174,402x10 ¹	125,000x10 ¹	0,125	0

0,605	173,325x10 ¹	125,000x10 ¹	0,130	0
0,610	171,172x10 ¹	125,000x10 ¹	0,120	0

La metodología de investigación empleó el método cuantitativo, con una muestra de 34 intensidades de la zona Vis (ver la Tabla 1), obtenida a partir de la técnica documental mediante el Software Paint a través del espectro de radiación directa (ver la Figura 2) registrado con el pirheliómetro Eppley de incidencia normal. La medición se realizó al aire libre, en el área del Departamento de Física de la Universidad Heredia, el 20 de Agosto del 2002, bajo condiciones de cielo despejado e iluminación de sol directa. Durante la medición, la temperatura osciló entre 20 y 40 grados Celsius, sensibilidad 8 mV/m², impedancia 200 Ω , linealidad $\pm 0.5\%$ de 0 a 2,800x10³ W/m² (Wright, 2003).

2.4 Modelo matemático

Planteamos el problema de optimización, definido como $\zeta: \mathfrak{R}^3 \rightarrow \mathfrak{R}$ con región de factibilidad $\vartheta = \{a \in \mathfrak{R}^3\}$ (Ferry et al., 2021).

$$\zeta(a) = \sum_{\lambda} [\mathcal{H}(a) - 1]^2 \quad (10)$$

$$a \in \mathfrak{R}^3.$$

Donde $\mathcal{H}(a) = i_{\lambda}(\lambda, a) / i_{\lambda_e}$ sin unidades, siendo $a = [a_1 \ a_2 \ a_3]^t = [l \ \beta \ w]^t$.

La Ecuación 10 es la función a minimizar y corresponde al problema de minimización sin restricciones.

A partir de la Tabla 1, se puede observar que $k_{\lambda_w} = 0$ para la zona Vis, se sustituye ese valor. En la Ecuación 9 se obtiene:

$$t_{\lambda_w}(w, (0), m_r) = \exp[-0,2385w(0)m_r / (1 + 20,07w(0)m_r)^{0,45}], \quad (11)$$

entonces,

$$t_{\lambda_w}(w, (0), m_r) = 1, \quad (12)$$

reemplazando la Ecuación 12 en la Ecuación 1 obtenemos,

$$i_{\lambda}(\lambda, l, \beta) = (r/r_0)^2 i_{\lambda_0}(\lambda) t_{\lambda_r}(\lambda, m_a) t_{\lambda_o}(k_{\lambda_0}, l, m_o) t_{\lambda_a}(\lambda, \beta, m_a), \quad (13)$$

esta ecuación reduce un grado de libertad en la Ecuación 10, se obtiene:

$$\zeta(a) = \sum_{\lambda} [\mathcal{H}(a) - 1]^2 \quad (14)$$

$$a \in \mathfrak{R}^2.$$

Con $a = [a_1 \ a_2]^t = [l \ \beta]^t$, queda la función objetivo simplificada a $\zeta: \mathfrak{R}^2 \rightarrow \mathfrak{R}$ con región de factibilidad $\vartheta = \{a \in \mathfrak{R}^2\}$ (Dwail & Shiker, 2020).

Cuando se obtiene un minimizador local a^* de la Ecuación 14, la diferencia entre los valores de $i_{\lambda}(\lambda, a)$ y i_{λ_e} se minimiza.

Una estrategia para resolver el problema de optimización sin restricciones es:

Paso 1: Resuelva el sistema de ecuaciones

$$\text{grad } \xi(a) = 0, \quad (15)$$

y obtenga una solución a^* .

Paso 2: Verificar si la matriz hessiana en a^* es definida positiva, es decir $\text{hessian } \xi(a) > 0$. Si fuera el caso, entonces a^* es un minimizador local estricto del problema de optimización.

Esta estrategia puede ser implementada en un programa en Matlab 19.0 mediante el Algoritmo básico con corrección de Armijo usando backtracking, dado de la forma:

Sean $\alpha \in (0, 1)$, $a^{(k)}$ y $d^{(k)}$, tal que

$$\text{grad } \zeta(a^{(k)})^t d^{(k)} < 0, \quad (16)$$

definir $\delta=1$.
Mientras

$$\zeta(a^{(k)} + \delta^k d^{(k)}) > \zeta(a^{(k)}) + \alpha \delta^k \text{grad } \zeta(a^{(k)})^t d^{(k)}, \quad (17)$$

escoger $\delta \in [0,1\delta; 0,9\delta]$, caso contrario, definir $\delta^{(k)} = \delta$
hacer $a^{(k+1)} = a^{(k)} + \delta^{(k)} d^{(k)}$.

2.5 Consideraciones y limitaciones del método de minimización irrestrita

La estrategia algoritmo básico con corrección de Armijo usando backtracking para la minimización irrestrita puede converger a mínimos locales a^* en lugar de mínimo global deseado, especialmente en funciones no convexas (ver la Ecuación 14). Además, son sensibles a las condiciones iniciales y pueden experimentar convergencia lenta, especialmente en problemas de alta dimensionalidad (grados de libertad). Requieren derivadas de la función objetivo (ver la Ecuación 16) y pueden ser computacionalmente costosos (ver la Figura 3), además de ser sensibles a la escala de las variables a y los criterios de terminación de la iteración (ver la Ecuación 17). La elección del algoritmo adecuado es crucial, ya que algunos pueden ser más robustos que otros frente al ruido o la presencia de múltiples mínimos locales.

2.6 Programa en Matlab 19.0

El algoritmo de Armijo implementado en el Software Matlab 19.0 a partir del problema matemático (ver la Ecuación 14) se obtiene un minimizador local a^* , este método controla la dirección del vector gradiente que hace que la función objetivo disminuya de modo que ζ siempre sea continua y diferenciable, basado en el diagrama (ver la Figura 3).

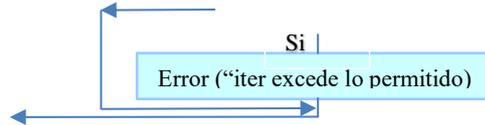


Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo de Armijo en Matlab 19.0

2.7 Parámetros de incertidumbre de la banda Vis

El error de sesgo medio relativo (rMBE) y error cuadrático medio relativo (rRMSE) (Masoom et al., 2020) de los valores de $i_\lambda(\lambda, a)$ son definidos como:

$$\text{rMBE} = (100/N) (\sum (i_{\lambda e} - i_\lambda(\lambda, a)) / i_{\lambda e, \text{prom}}), \quad (18)$$

y

$$\text{rRMSE} = (100/i_{\lambda e, \text{prom}}) (\sqrt{[(1/N) \sum (i_{\lambda e} - i_\lambda(\lambda, a))^2]}), \quad (19)$$

donde N es el número de datos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

En la Tabla 2, se presenta el optimizador a^* de ζ (ver la Ecuación 14) mediante la ejecución del algoritmo Armijo en Matlab 19.0 en 33 iteraciones (ver la Tabla 3).

También, es posible visualizar que los datos del optimizador a^* es característica de una atmósfera turbia que no posee adelgazamiento de la capa de ozono de cielo blanco alternado. A partir de los valores de l y β , solo β es preponderante en la zona Vis, esto se debe a que es principalmente atenuada por la presencia de aerosoles.

Tabla 2. Datos obtenidos del programa en Matlab 19.0, para estación del Departamento de Física de la Universidad Heredia

Optimizador	
$a^* = [a_1^* \ a_2^*] = a^{(33)} = [57,40 \times 10^{-2} \ 3,69 \times 10^{-2}]$	
Espesor de ozono	Coefficiente de turbidez por aerosoles
$a_1^* = l = 57,40 \times 10^{-2}$ cm	$a_2^* = \beta = 3,69 \times 10^{-2}$
Modelo de transferencia de la zona Vis	
$i_\lambda(\lambda, l, \beta, w)$	
$(r/r_0)^2 i_{\lambda_0}(\lambda) t_{\lambda_0}(\lambda, m_a) t_{\lambda_0}(k_{\lambda_0}; 57,40 \times 10^{-2}; m_o) t_{\lambda_0}(\lambda; 3,69 \times 10^{-2}; m_a)$	

Tabla 3. Valores factibles de a del programa en Matlab 19.0

Iter	$a^{(k)}$	Iter	$a^{(k)}$
0	(10,00; 20,00) x 10 ⁻²	17	(3,79; 50,72) x 10 ⁻²
1	(16,70; 31,78) x 10 ⁻²	18	(3,76; 52,83) x 10 ⁻²
2	(17,80; 30,27) x 10 ⁻²	19	(3,74; 54,37) x 10 ⁻²
3	(15,14; 29,86) x 10 ⁻²	20	(3,72; 55,46) x 10 ⁻²
4	(12,06; 29,71) x 10 ⁻²	21	(3,71; 56,20) x 10 ⁻²
5	(9,30; 29,55) x 10 ⁻²	22	(3,70; 56,69) x 10 ⁻²
6	(7,42; 29,40) x 10 ⁻²	23	(3,70; 57,00) x 10 ⁻²
7	(6,14; 29,28) x 10 ⁻²	24	(3,69; 57,18) x 10 ⁻²
8	(5,30; 29,26) x 10 ⁻²	25	(3,69; 57,28) x 10 ⁻²
9	(4,78; 29,43) x 10 ⁻²	26	(3,69; 57,34) x 10 ⁻²
10	(4,46; 29,94) x 10 ⁻²	27	(3,69; 57,37) x 10 ⁻²
11	(4,27; 31,04) x 10 ⁻²	28	(3,69; 57,38) x 10 ⁻²
12	(4,15; 33,04) x 10 ⁻²	29	(3,69; 57,39) x 10 ⁻²
13	(4,06; 36,18) x 10 ⁻²	30	(3,69; 57,39) x 10 ⁻²
14	(3,97; 40,21) x 10 ⁻²	31	(3,69; 57,39) x 10 ⁻²
15	(3,90; 44,34) x 10 ⁻²	32	(3,69; 57,40) x 10 ⁻²
16	(3,84; 47,90) x 10 ⁻²	33	(3,69; 57,40) x 10 ⁻²

Como la función objetivo simplificada está definida como $\zeta: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, es posible graficarla. Mediante la Figura 4, se puede

visualizar que la mínima altura correspondería a $l=57,40 \times 10^{-2}$ cm y $\beta=3,69 \times 10^{-2}$.

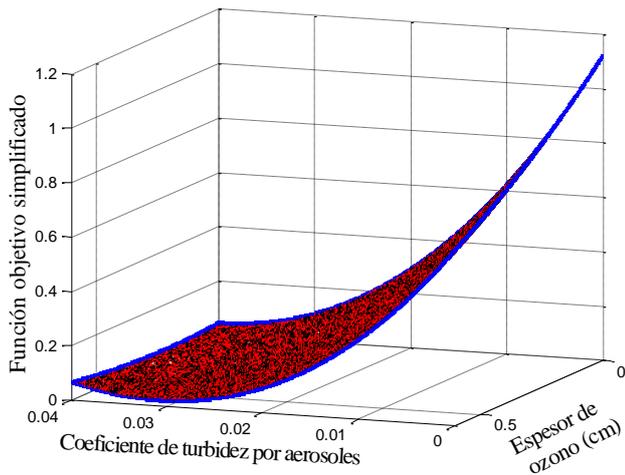


Figura 4. Ilustración de ζ en relación a l y β utilizando Matlab 19.0

Para corroborar esta afirmación mediante la Figura 5, ζ en función de β mantiene constante el dato optimizado de l . También, se visualiza que la función ζ tiene su menor altura en el rango $0 < \beta < 0,05$ llamado “restricción”. Nuestro dato optimizado a_2^* se encuentra dentro de ese rango. Finalmente, deseamos comparar los datos de radiación solar Vis experimental y teórica.

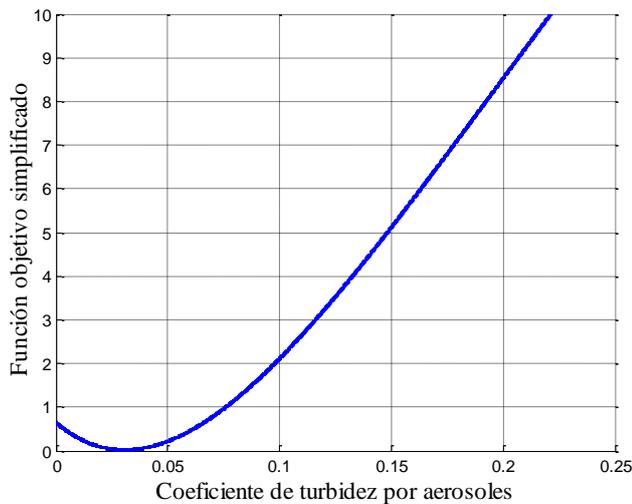


Figura 5. Ilustración de ζ en relación a β conservando constante $l=57,40 \times 10^{-2}$ cm utilizando Matlab 19.0

Mediante la Figura 6a, se visualiza que en la zona Vis existe una concordancia entre los datos empíricos y los calculados teóricamente.

La Figura 6b ilustra una visualización comparativa entre los rayos monocromáticos extraterrestres y los calculados teóricamente en la zona Vis. Además, se visualiza que en la zona Vis la i_{λ_0} directa es atenuada en su trayectoria por: dispersión de moléculas de aire (dispersión Rayleigh), absorción por aerosoles y capa de ozono, en su paso por la atmósfera, llegando i_{λ} a la superficie de la Tierra.

También, mostramos los resultados de los parámetros de incertidumbre del modelo de transferencia de la zona Vis en la Tabla 4. Igualmente, se observa que las incertidumbres son pequeñas, siendo un buen indicativo que el modelo de transferencia de radiación da una buena estimación de la zona Vis.

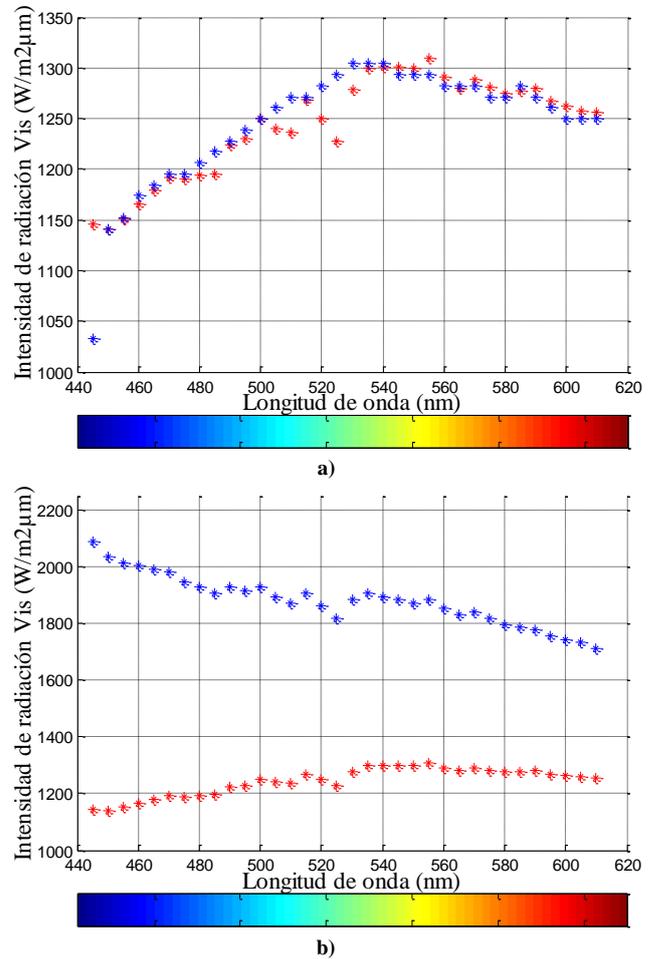


Figura 6. Visualización comparativa a) entre i_{λ_e} y i_{λ} , b) entre i_{λ_0} y i_{λ} utilizando Matlab 19.0

Tabla 4. Incertidumbre de los datos calculados de la zona Vis

rMBE	rRMSE
0,132%	2,066%

3.2 Discusión

El modelo desarrollado de radiación de la zona Vis, posee las herramientas de medición (Wright, 2003), recopilación de datos (Software Paint) y técnicas de modelado (Di Pietro, 2022) (algoritmo de Armijo). Los cálculos de l, β en Matlab 19.0 permiten saber cómo cambia la radiación Vis, con un sesgo pequeño (Masoom et al., 2020).

El optimizador obtenido por la técnica algoritmo básico con corrección de Armijo usando backtracking, en este trabajo fue un optimizador global. Esto se debe a que mediante la Figura 4, se pudo buscar datos (ver la Tabla 3) dentro de la región de factibilidad del problema de optimización (ver la Ecuación 10), sin embargo, en general no siempre se podrá visualizar la

función objetivo, lo que limita a encontrar minimizadores locales.

Los resultados obtenidos a través del enfoque de minimización irrestrita en la optimización de parámetros l , β del modelo de la función objetivo simplificada en la zona Vis han demostrado ser válidos y robustos en varios aspectos. La validez de los resultados se sustenta en la mejora de la precisión y robustez en la estimación de algunos parámetros del modelo fotovoltaico de Dan (Duan et al., 2023). Esta mejora en la precisión contribuye a una extracción más confiable de los parámetros tanto la zona Vis como de módulos fotovoltaicos, lo que sugiere que el enfoque de minimización irrestrita es efectivo en mejorar la calidad de los resultados obtenidos. Debido a que nuestra función objetivo simplificada tuvo baja dimensionalidad, su convergencia fue rápida en comparación con la de los modelos de Premkumar y Li (Li et al., 2023; Premkumar et al., 2023).

Una posible fuente de error fue la sensibilidad a la escala de las variables l , β y los criterios del algoritmo de Armijo respecto a la terminación de la iteración, que afectó la convergencia del algoritmo y por ende la precisión de los resultados. El algoritmo de minimización irrestrita pudo ser sensible a las variaciones de las condiciones iniciales provocando soluciones muy diferentes, lo que podría afectar la precisión de la estimación de los parámetros del modelo de la zona Vis.

Se sugiere establecer la técnica de algoritmo de Armijo para el diseño de procesamiento de optimización de datos de la zona Vis, esto puede implicar el uso de sensores, controladores, software y hardware especializado con el fin de lograr resultados más favorables.

CONCLUSIONES

Conforme con los hallazgos obtenidos, se deduce que se logró estimar la Zona Visible mediante el cálculo de modelos: transferencia de la zona Vis, modelo matemático “función objetivo simplificada” y uso de la técnica “algoritmo básico con corrección de Armijo usando backtracking”. Mediante la implementación del algoritmo de Armijo en un programa en el Software Matlab 19.0, se obtuvo un minimizador local a^* de una función objetivo sin restricciones. A partir de los datos de minimizador, concluimos que los datos empíricos de radiación de la zona Vis pertenecen a una atmósfera sin agujero de ozono con cielo blanco alternado turbio para la estación del Departamento Académico de la Universidad de Heredia. La ilustración de ζ en relación con β permite determinar la restricción del valor del coeficiente de turbidez por aerosoles, el cual podría ser utilizado para el uso del método de optimización con restricciones de desigualdad.

REFERENCIAS

- Abunima, H., Teh, J., & Jabir, H. J. (2019). A new solar radiation model for a power system reliability study. *IEEE Access*, 7, 64758–64766. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916168>
- Alamatsaz, K., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Iranpoor, M. (2021). Minimal covering unrestricted location of obnoxious facilities: bi-objective formulation and a case study. *OPSEARCH*, 58(2), 351–373. <https://doi.org/10.1007/s12597-020-00487-0>
- Alghamdi, A. S. (2023). Optimal Power Flow of Hybrid Wind/Solar/Thermal Energy Integrated Power Systems Considering Costs and Emissions via a Novel and Efficient Search Optimization Algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/app13084760>
- Aliyeva, Y. N., Mammadova, K. A., & Huseynova, A. N. (2022). A Theoretical Model of RGB Attenuation of Solar Radiation Components Under Strong Aerosol Pollution of the Atmosphere. *Aerosol Science and Engineering*, 1-4. <https://doi.org/10.1007/s41810-021-00120-7>
- Bai, J., & Zong, X. (2021). Global solar radiation transfer and its loss in the atmosphere. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062651>
- Basith, A., Ulin Nuha, M., Prastyani, R., & Winarso, G. (2019). COMMUNICATIONS IN SCIENCE AND TECHNOLOGY Aerosol optical depth (AOD) retrieval for atmospheric correction in Landsat-8 imagery using second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV). In *Communications in Science and Technology* (Vol. 4, Issue 2). <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Bosca Berga, J. V. (1995). *Contribucion al estudio de la radiacion solar y de la determinacion de la turbiedad atmosferica. Aplicacion a Valencia y Sevilla*. [Universitat Politècnica de València]. In *Riunet*. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/4502>
- Borah, P., & Gupta, D. (2020). Unconstrained convex minimization based implicit Lagrangian twin extreme learning machine for classification (ULTELMC). *Applied Intelligence*, 50(4), 1327–1344. <https://doi.org/10.1007/s10489-019-01596-0>
- Costa, R. S., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2012). Aerossóis atmosféricos e a quantificação do recurso energético solar: experimentos em modelo de transferência radiativa. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 3(1), 62–62. <https://doi.org/10.59627/rbens.2012v3i1.79>
- Cox, J. L., Hamilton, W. T., Newman, A. M., Wagner, M. J., & Zolan, A. J. (2023). Real-time dispatch optimization for concentrating solar power with thermal energy storage. *Optimization and Engineering*, 24(2), 847–884. <https://doi.org/10.1007/s11081-022-09711-w>
- de Wijn, A. G., Casini, R., Carlile, A., Lecinski, A. R., Sewell, S., Zmarzly, P., Eigenbrot, A. D., Beck, C., Wöger, F., & Knölker, M. (2022). The Visible Spectro-Polarimeter of the Daniel K. Inouye Solar Telescope. *Solar Physics*, 297(2). <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01954-1>
- Di Pietro, S. (2022). Processes of urban transition to autonomous decentralized systems of renewable energy. *Estudios Demograficos y Urbanos*, 37(3), 807–837. <https://doi.org/10.24201/edu.v37i3.2073>
- Drozdowski, M., & Shakhlevich, N. V. (2021). Scheduling divisible loads with time and cost constraints. *Journal of*

- Scheduling*, 24(5), 507–521. <https://doi.org/10.1007/s10951-019-00626-6>
- Duan, Z., Yu, H., Zhang, Q., & Tian, L. (2023). Parameter Extraction of Solar Photovoltaic Model Based on Nutcracker Optimization Algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/app13116710>
- Dwail, H. H., & Shiker, M. A. K. (2020). Using a trust region method with nonmonotone technique to solve unrestricted optimization problem. *Journal of Physics: Conference Series*, 1664(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012128>
- Emiola, I., Adem, R. (Junio, 2021). Comparison of Minimization Methods for Rosenbrock Functions. Work presented at 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), PUGLIA, pp. 837-842. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480200>
- Eslami, M., Akbari, E., Seyed Sadr, S. T., & Ibrahim, B. F. (2022). A novel hybrid algorithm based on rat swarm optimization and pattern search for parameter extraction of solar photovoltaic models. *Energy Science and Engineering*, 10(8), 2689–2713. <https://doi.org/10.1002/ese3.1160>
- Farag, M. M., Patel, N., Hamid, A. K., Adam, A. A., Bansal, R. C., Bettayeb, M., & Mehiri, A. (2023). An Optimized Fractional Nonlinear Synergic Controller for Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Array under Abrupt Irradiance Change. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 13(2), 305–314. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3236808>
- Fei, L., Yin, Y., Yang, M., Zhang, S., & Wang, C. (2021). Wearable solar energy management based on visible solar thermal energy storage for full solar spectrum utilization. *Energy Storage Materials*, 42, 636–644. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.07.049>
- Ferry, M. W., Gill, P. E., Wong, E., & Zhang, M. (2021). *Projected-Search Methods for Bound-Constrained Optimization*. <http://arxiv.org/abs/2110.08359>
- Filos-Ratsikas, A., Kanellopoulos, P., Voudouris, A. A., & Zhang, R. (2023). *Settling the Distortion of Distributed Facility Location*. <http://arxiv.org/abs/2301.01604>
- Franc, V., Yermakov, A., Balasubramanian, V. N., & Tsang, I. (2021). Learning Maximum Margin Markov Networks from examples with missing labels. In *Proceedings of Machine Learning Research* (Vol. 157)
- Ghosh, S., Acharya, T., & Maity, S. P. (2019). On outage minimization in RF energy harvesting relay assisted bidirectional communication. *Wireless Networks*, 25(7), 3867–3881. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-01924-1>
- Gueymard, C. A., & Kambezidis, H. D. (2004). SOLAR RADIATION AND DAYLIGHT MODELS. In *Solar Spectral Radiation* (pp. 221-301). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-075065974-1/50013-9>
- Hamilton, W. T., Husted, M. A., Newman, A. M., Braun, R. J., & Wagner, M. J. (2020). Dispatch optimization of concentrating solar power with utility-scale photovoltaics. *Optimization and Engineering*, 21(1), 335–369. <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09449-y>
- Hoque, A., & Islam, M. T. (2020). Numerical Analysis of Single Negative Broadband Metamaterial Absorber Based on Tri Thin Layer Material in Visible Spectrum for Solar Cell Energy Harvesting. *Plasmonics*, 15(4), 1061–1069. <https://doi.org/10.1007/s11468-020-01132-8>
- Ilango, R., Loff, B., & Oliveira, I. C. (2020). NP-Hardness of circuit minimization for multi-output functions. *Leibniz International Proceedings in Informatics, LIPIcs*, 169. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.CCC.2020.22>
- Iqbal, M. (1983). A CLOUDLESS-SKY ATMOSPHERE AND ITS OPTICS. In *An Introduction to Solar Radiation* (pp. 85–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373750-2.50010-0>
- Jiang, H., & Dong, Y. (2016). A nonlinear support vector machine model with hard penalty function based on glowworm swarm optimization for forecasting daily global solar radiation. *Energy Conversion and Management*, 126, 991–1002. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.069>
- Kairouz, P., Ribero, M., Rush, K., & Thakurta, A. (2020). Fast dimension independent private adagrad on publicly estimated subspaces. *arXiv preprint arXiv:2008.06570*
- Lefèvre, M., Oumbe, A., Blanc, P., Espinar, B., Gschwind, B., Qu, Z., Wald, L., Schroedter-Homscheidt, M., Hoyer-Klick, C., Arola, A., Benedetti, A., Kaiser, J. W., & Morcrette, J. J. (2013). McClear: A new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(9), 2403–2418. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2403-2013>
- Li, J., Qin, C., Yang, C., Ai, B., & Zhou, Y. (2023). Extraction of Single Diode Model Parameters of Solar Cells and PV Modules by Combining an Intelligent Optimization Algorithm with Simplified Explicit Equation Based on Lambert W Function. *Energies*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/en16145425>
- Li, Y., Liu, Z., & Liu, H. (2019). A subspace minimization conjugate gradient method based on conic model for unconstrained optimization. *Computational and Applied Mathematics*, 38(1). <https://doi.org/10.1007/s40314-019-0779-7>
- Lisenko, S. A. (2018). Atmospheric correction of multispectral satellite images based on the solar radiation transfer approximation model. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 31(1), 72–85. <https://doi.org/10.1134/S1024856018010116>
- Manoharan, H., Teekaraman, Y., Kuppasamy, R., & Radhakrishnan, A. (2021). A Novel Optimal Robotized Parking System Using Advanced Wireless Sensor Network. *Journal of Sensors*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2889504>
- Masoom, A., Kosmopoulos, P., Bansal, A., & Kazadzis, S. (2020). Solar energy estimations in india using remote sensing technologies and validation with sun photometers in urban areas. *Remote Sensing*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/rs12020254>
- Mims, F. M. (2022). A 30-Year Climatology (1990-2020) of Aerosol Optical Depth and Total Column Water Vapor and Ozone over Texas. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(1), E101–E109. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0010.1>

- Paixão, D. F. S., Quirino, P. P. S., Fialho, R. L., Americano Da Costa, M. V., & Pontes, K. V. (2023). A dynamic optimization approach for a multi-effect desalination (MED) integrated with thermosolar storage system. *Solar Energy*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111837>
- Premkumar, M., Shankar, N., Sowmya, R., Jangir, P., Kumar, C., Abualigah, L., & Derebew, B. (2023). A reliable optimization framework for parameter identification of single-diode solar photovoltaic model using weighted velocity-guided grey wolf optimization algorithm and Lambert-W function. *IET Renewable Power Generation*, 17(11), 2711–2732. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12792>
- Stefanov, S. M. (2021). Numerical solution of some systems of nonlinear algebraic equations. *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 24(6), 1545–1564. <https://doi.org/10.1080/09720502.2020.1833462>
- Stutzmann, M., & Csoklich, C. (2022). *The Physics of Renewable Energy Graduate Texts in Physics*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-17724-8>
- Upadhyay, V. A., Geisler, B. P., Sun, L., Uhl, L., Kaufman, R. M., Stowell, C., Makar, R. S., & Bendapudi, P. K. (2019). Utilizing a PLASMIC score-based approach in the management of suspected immune thrombotic thrombocytopenic purpura: a cost minimization analysis within the Harvard TMA Research Collaborative. *British Journal of Haematology*, 186(3), 490–498. <https://doi.org/10.1111/bjh.15932>
- Wen, T. H., Chuang, T. W., & Tipayamongkholgul, M. (Eds.). (2023). *Earth Data Analytics for Planetary Health*. Springer Nature
- Wright, J. (2003). Validación experimental de un modelo espectral para la radiación solar directa en condiciones de cielos claros. *Top. Meteor. Oceanog*, 10(2), 47–56.
- Wu, H., & Dumitrescu, S. (2020). Design of General Entropy-Constrained Successively Refinable Unrestricted Polar Quantizer. *IEEE Transactions on Communications*, 68(6), 3369–3385. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2979113>
- Zakinyan, R., & Zakinyan, A. (Eds.). (2023). *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-19012-4>
- Zo, I. S., Jee, J. B., & Lee, K. T. (2014). Development of GWNU (Gangneung-Wonju National University) one-layer transfer model for calculation of solar radiation distribution of the Korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 575–584. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0047-0>

BIOGRAFÍAS



Reynaldo, Quispe, Licenciado en Física por la UNSA (2006), Magíster de la Escuela de Postgrado de Maestría en Educación mención: Investigación y Docencia en Educación Superior por la UANCV (2017), Maestro en Ciencias: con mención en Física por la UNSA (2022), realiza estudios de Postgrado de Maestría en Ciencias, Física aplicada a la Medicina y Radioprotección en la UNSA (2022), docente seleccionado por PMESUT del programa de capacitación en investigación científica (2022), docente seleccionado para la presentación de POSTER de un trabajo de investigación en la UNAMAD (2022), Diplomado de Especialización en Docencia de Educación Superior (2021).



Verónica, Juli, Estudiante de la Escuela Profesional de Física de la UNSA (2023), realiza trabajos de investigación en el Área de Energías Renovables, seleccionada para la presentación de POSTER de un trabajo de investigación en la UNAMAD (2022).

Efectos del Cartón y Cerámica Reciclada en las Propiedades del Concreto Hidráulico

Carpio, Bryan^{1*} ; Muñoz, Abel² 

¹Universidad César Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Lima, Perú

²Universidad César Vallejo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Lima, Perú

Resumen: El problema del concreto hidráulico en canales abiertos se deriva de factores de diseño, construcción deficiente y condiciones climatológicas adversas que hacen que el concreto sea menos duradero y propenso a desarrollar defectos superficiales que debilitan su resistencia física y mecánica. El estudio analizó el efecto de la ceniza de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico. La investigación fue de diseño experimental, que incluyó ensayos de absorción de agua, permeabilidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Se utilizaron diferentes combinaciones para sustituir el cemento en proporciones de CC 1,5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4,5 % + RC 3 %, y CC 6 % + RC 4 %, que luego se compararon con la norma ASTM y una muestra control. Los resultados indicaron una absorción de agua de 0,061 g/s y una permeabilidad de 297,09 g/m², ambas inferiores. Las mayores resistencias mecánicas a los 7, 14 y 28 días alcanzaron resistencias a compresión de 191,75 ± 1,22 kg/cm², 274,38 ± 3,06 kg/cm², 323,34 ± 6,85 kg/cm², y resistencias a flexión de 31,32 ± 0,04 kg/cm², 33,23 ± 0,16 kg/cm² y 35,76 ± 0,31 kg/cm². Se concluye que la combinación óptima para los ensayos físicos y mecánicos se consigue con la combinación de CC 3 % y RC 2 %; para una mayor cantidad de CC y RC respecto a la muestra óptima, el concreto tiende a deteriorarse y perder resistencia.

Palabras clave: Concreto hidráulico, ceniza de cartón, cerámico reciclado, resistencia física y mecánica

Effects of cardboard and recycled ceramics on the properties of hydraulic concrete

Abstract: The problem of hydraulic concrete in open channels stems from design factors, poor construction, and adverse weather conditions that make the concrete less durable and prone to developing surface defects that weaken its physical and mechanical strength. The study looked at the effect of cardboard ash (CC) and recycled ceramic (RC) on the physical and mechanical properties of hydraulic concrete. The research was of experimental design, which included tests of water absorption, permeability, compressive strength and flexural strength. Different combinations were used to replace cement in proportions of CC 1.5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4.5 % + RC 3 %, and CC 6 % + RC 4 %, which were then compared to the ASTM standard and a control sample. The results indicated a water absorption of 0.061 g/s and a permeability of 297.09 g/m², both lower and lower. The highest mechanical strength at 7, 14 and 28 days reached compressive strengths of 191.75 ± 1.22 kg/cm², 274.38 ± 3.06 kg/cm², 323.34 ± 6.85 kg/cm², and flexural resistance of 31.32 ± 0.04 kg/cm², 33.23 ± 0.16 kg/cm² and 35.76 ± 0.31 kg/cm². It is concluded that the optimal combination for physical and mechanical tests is achieved with the combination of CC 3 % and CR 2 %; for a greater amount of CC and CR with respect to the optimal sample, the concrete tends to deteriorate and lose strength.

Keywords: Hydraulic concrete, cardboard ash, recycled ceramic, physical and mechanical resistance

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de las estructuras hidráulicas es regular el flujo de agua en los canales tanto en ecosistemas naturales como artificiales. Por ello, varios estudios han identificado retos y técnicas para controlar las estructuras hidráulicas que puedan

cumplir con éxito y eficacia su propósito (Abubakar et al., 2020). El problema del concreto hidráulico en canales abiertos se deriva de factores de diseño, construcción deficiente y condiciones climatológicas adversas que hacen que el concreto sea menos duradero y propenso a desarrollar defectos superficiales que debilitan su resistencia física y mecánica.

*bdcarpio@ucvvirtual.edu.pe

Recibido: 23/11/2023

Aceptado: 19/07/2024

Publicado en línea: 31/08/2024

10.33333/tp.vol54n1.10

CC 4.0

Los aditivos que se utilizan en los materiales cementosos modernos para mejorar sus características mecánicas y de durabilidad, su uso generalizado en la fabricación del concreto los hace notoriamente muy costosos (Paul et al., 2022). El concreto ha encontrado un amplio uso en aplicaciones de construcción, por lo que analizar el reciclaje y la reutilización del polvo de cerámico procedente de los escombros de construcción como material cementante suplementario en la fabricación del concreto es una muy buena opción (Zhang et al., 2023). En comparación con el uso de agregados naturales, la utilización de residuos de construcción y demolición en la producción de concreto y mortero tiene un impacto medioambiental reducido (Barrios et al., 2021).

Las actividades industriales, construcción y demolición producen grandes cantidades de residuos, como los residuos de ladrillos, cerámicas, el papel y el cartón (de Matos et al., 2021). Los restos de papel y cartón contribuyen en gran medida a la contaminación de los vertederos y los centros de producción. El sector manufacturero produce cada año más de estos residuos que contribuyen a la contaminación y la demanda de ampliación de vertederos van en aumento, al igual que el consumo de energía y recursos naturales que son de preocupación mundial (Solahuddin & Yahaya, 2021).

A nivel mundial existe un movimiento creciente para reciclar y reutilizar los residuos de construcción y demolición, se calcula un aproximado del 35 % de la cantidad producida se trasladan a vertederos sin ningún tratamiento posterior (Menegaki & Damigos, 2018). En consecuencia, la sostenibilidad de la construcción y el reciclado de los residuos se están convirtiendo en preocupaciones medioambientales de primer orden (Amin et al., 2023).

Los materiales reciclados procedentes de demoliciones de construcciones con bajas emisiones de carbono podrían producirse para sustituir al Clinker Portland como polvo de cemento endurecido y pueden ofrecer una forma de reducir el CO₂ y la carbonatación mineral en los materiales cementosos. Su aplicación como tecnología de producción de cemento contribuiría a contrarrestar las consecuencias del aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Li et al., 2022). Por ello, varios investigadores han empezado a explorar materiales de construcción cementosos alternativos que puedan utilizarse como sustitutos parciales del cemento Portland (Demissew, 2022).

A medida que aumenta la necesidad del concreto de alta resistencia en diversos contextos, ganan popularidad productos como los compuestos de concreto hidráulicos fabricados a partir de residuos industriales o reciclados. Además de su resistencia, los compuestos tienen otras propiedades deseables, como baja contracción por secado, baja permeabilidad y resistencia a productos químicos y altas temperaturas (Alhazmi et al., 2021).

Brahimi et al. (2022) estudiaron el uso de residuos con material de Polietileno Tereftalato para sustituir al cemento, utilizaron porcentajes de 3,0 g, 1,75 g, 1,0 g y 2,25 g. Los resultados revelaron que los geo polímeros preparados contienen un gran porcentaje de cuarzo en forma de sílice, presentando una mejor

resistencia a las acciones externas debido a la dureza del material.

Por su parte, Fernández-Torrez et al. (2022) compararon concretos fabricados con residuos de caucho de neumáticos (RCN); utilizaron porcentajes de 5 %, 10 % y 20 % a las edades de 7 y 14 días. Los resultados muestran que los RCN superiores al 5 % reducen considerablemente la mala absorción en un 70 %, pero pierde resistencia a compresión y flexión en relación con la muestra sin contenido de RCN.

Salih et al. (2022), en su investigación, sustituyeron parcialmente el Cemento Portland Ordinario hasta en un 71 %, utilizando cenizas volantes, escoria granulada de alto horno (GGBS) y microsílce para producir concreto autocompactante duraderos y de alta resistencia. Se diseñaron dos grupos de mezclas. El primero contenía 14 %, 23,4 % y 32,77 % de cenizas volantes y 6,4 % de microsílce. El segundo contenía 32,77 %, 46,81 % y 65,5 % de GGBS y 6,4 % de microsílce. La mayoría de las pruebas reveló una alta resistencia a la compresión y durabilidad, la permeabilidad y la absorción al agua presentó un efecto significativo.

Saad et al. (2020), en su estudio evaluaron el comportamiento del uso de nuevos materiales en pavimentos de concreto rígido a las edades de 7 y 14 días. Ellos utilizaron dosificaciones de humo de sílice (0 % + 20 %) y caucho (0 % + 25 %). Los resultados mostraron que la resistencia a la compresión simple disminuía hasta un 20 % cuando se añadía caucho granulado al 25 %. La adición de humo de sílice aumentó la resistencia a la compresión y a la flexión.

Según Sadagopan et al. (2023), en su investigación se utilizaron agregados de concreto triturado (ACT) y GGBS en reemplazo de parcial del cemento en relaciones a/c de 0,42 y 0,48. Los agregados resultantes muestran una mayor densidad, lo que contribuye a un aumento en la resistencia a la compresión del concreto. Por tanto, el preprocesamiento mecánico se puede mejorar para producir ACT, lo que favorece a un comportamiento del concreto más dúctil.

El estudio unió los agregados para que actúen como adhesivo y den la resistencia deseada al concreto, al sustituir el cemento por combinaciones de CC y RC en proporciones específicas mediante el análisis de los efectos al utilizar materiales reciclados. De este modo, se reducen los daños causados por el cemento al medio ambiente y, al mismo tiempo, los costos excesivos generados por los proyectos de construcción. Las combinaciones utilizadas en el estudio se prepararon en proporciones variables de CC y RC, concretamente CC 1,5 % + RC 1 %, CC 3 % + RC 2 %, CC 4,5 % + RC 3 %, y CC 6 % + RC 4 %. Asimismo, se compararon con la norma ASTM y con una muestra control sin contenido de CC y RC.

El objetivo principal de este estudio es analizar el efecto de la ceniza de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en las propiedades físicas y mecánicas del concreto hidráulico. Los materiales proceden de vertederos y demoliciones de obras de construcción a escala mundial, materiales que contribuyen a la descontaminación medioambiental y mejoras de las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto.

La importancia del estudio es especialmente relevante, porque con frecuencia se desechan cantidades sustanciales de estos materiales, que acaban en vertederos o escombreras. Esta investigación abordó la importancia de utilizar materiales reciclables en el concreto hidráulico mediante el diseño de mezclas y la realización de ensayos de resistencia física y mecánica que aportaron en la mitigación de los efectos perjudiciales del deterioro en el concreto hidráulico.

2. METODOLOGÍA

La investigación se clasificó como aplicada, porque resolvió los problemas asociados al concreto hidráulico. Esta disciplina académica se caracterizó por su énfasis en la aplicación práctica de la información adquirida. Además, el estudio utilizó un diseño experimental, porque varió la variable independiente mediante una manipulación deliberada para ver su impacto en la variable dependiente.

La población la conformaron 240 probetas cilíndricas de 300 mm x 15 mm de diámetro y 60 probetas rectangulares de 42 cm x 15 cm x 12 cm, las mismas que se dividieron en una muestra de 180 probetas para ensayos de resistencia mecánica (compresión y flexión) y una muestra de 60 probetas para ensayos de resistencia física (absorción y permeabilidad).

La investigación utilizó la técnica de observación directa, porque los investigadores participaron activamente en todas las fases de elaboración de las muestras y en las pruebas de laboratorio, incluidas las evaluaciones físicas y mecánicas. El método de muestreo empleado fue no probabilístico, es decir, basado en el juicio, tras considerar detenidamente las características tanto de la población como de la muestra, teniendo en cuenta las directrices de la Norma Técnica Peruana (NTP) y la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

2.1. Estudios de Campo:

En el presente estudio, los investigadores supervisaron minuciosamente cada uno de los procedimientos de la recolección de material reciclado, agregados pétreos naturales y los ensayos de laboratorio, que se llevaron a cabo en cuatro fases, las cuales se detallan a continuación.

Fase uno: consistió en la puesta en marcha del procedimiento de recogida de cartón por parte de la organización "Pro-Ecología". Esta empresa se encarga de la selección y recuperación sistemática de materiales de papel y cartón en diversos puntos de la ciudad del Cusco. El material de cartón se sometió a combustión para crear cenizas, que luego se refinaron hasta convertirlas en polvo. El peso específico del polvo resultante fue evaluado mediante ensayos de laboratorio, lo cual arrojó un valor de 2,22 g/cm³.

Fase dos: consistió en la recuperación de los residuos de cerámica generada durante la construcción del Pabellón "B" en el campus Cusco de la Universidad Continental. Posteriormente, la sustancia fue sometida a pulverización y posteriormente a medición de densidad, alcanzando una gravedad específica de 2,62 g/cm³.

Fase tres: consistió en la recogida de agregados pétreos. Se eligió la cantera de Vicho ubicada en la región Cusco como fuente de agregados gruesos (AG), mientras que la cantera de Huambutio fue seleccionada para los agregados finos (AF). Estas canteras se consideraron óptimas para la producción de concreto por ofrecer materias primas de alta calidad, cumplir las normas técnicas aplicables y ser fácilmente accesibles por carretera. Este factor de accesibilidad contribuye a reducir el costo por m³ de material entregado en la obra.

Fase cuatro: consistió en la producción de probetas cilíndricas y rectangulares, que posteriormente, se sometieron a curado de intervalos de tiempo específicos de 7, 14 y 28 días naturales para la resistencia mecánica. Asimismo, las pruebas de absorción de agua y de permeabilidad se realizaron con probetas en edad de 28 días, debido a que este es el tiempo necesario para determinar su máxima capilaridad y resistencia.

2.2. Estudios de laboratorio:

En esta sección, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, a la flexión, absorción de agua, y permeabilidad mediante ensayos de laboratorio estandarizados por las normas internacionales y nacionales como son:

- ASTM C33/CMMM-18 (2018)
- ASTM D854-14 (2023)
- ASTM C1585-20 (2020)
- ACI PRC-522 R-10 (2011)
- IRAM1871 (2021)
- ASTM C33/C39M-21 (2021)
- ASTM C78/C78M (2022)
- NTP 339.034 (2021)
- NTP 339.078 (2022)
- MTC E-107-200 (2016)

Se realizó el ensayo tanto de los agregados gruesos como de los finos, y los valores resultantes se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipologías de los materiales naturales y reciclados

Material	AG	AF	CC	RC
Peso específico (g/cm ³)	2,49	2,51	2,22	2,62
Absorción (%)	1,16	0,76	-	-
Contenido de humedad (%)	2,03	1,37	1,01	1,45
Módulo de fineza	6,90	2,37	0,16	0,26
Peso compactado seco (kg/m ³)	1 596,45	1 630,02	1 327,21	1 439,33
Peso suelto seco (kg/m ³)	1 580,87	1 495,56	1 203,27	1 356,92
TMN (pulg)	1/2"	Nº 4	-	-

Nota: Agregado Grueso (AG), Agregado Fino (AF), Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC), Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Se formuló, de acuerdo con la metodología ACI-211.1. (2002), un diseño de mezcla plástica de 280 kg/cm². En el diseño de la mezcla se utilizó cemento portland IP, conocido por su gravedad específica de 2,85 g/cm³. Los resultados obtenidos del diseño de la mezcla plástica se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño de mezcla plástica

Material	Dosificación 280 kg/cm ²		
	Volumen	Tandas	Valores de diseño
Cemento	1,0 pie ³ /pie ³	42,5 kg/bolsa	528 kg/m ³
Agua de diseño	16,0 l/pie ³	16,0 l/bolsa	205 kg/m ³
Agregado fino	0,9 pie ³ /pie ³	39,4 kg/bolsa	490 kg/m ³
Agregado grueso	1,8 pie ³ /pie ³	80,0 kg/bolsa	994 kg/m ³

A partir de los datos obtenidos en el diseño de la mezcla, fue posible determinar las cantidades de materiales empleadas en la preparación de las probetas cilíndricas y rectangulares. La

Tabla 3 muestra, a continuación, los valores obtenidos relacionados con las cantidades necesarias para los cuatro diseños y una muestra de control sin contenido de CC y RC.

Tabla 3. Cantidad de materiales utilizados para elaboración de probetas

Materiales	Diseño	Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3		Diseño 4		Totales
	Muestra control 0,0 %	CC 1,5 % RC 1,0 %	CC 3,0 % RC 2,0 %	CC 4,5 % RC 3,0 %	CC 6,0 % RC 4,0 %					
Cemento (kg)	853,50	832,16	810,83	789,49	768,15	768,15	768,15	768,15	4 054,13	
Ceniza de cartón (kg)	0,00	12,80	25,61	38,41	51,21	51,21	51,21	51,21	128,03	
Cerámico reciclado (kg)	0,00	8,54	17,07	25,61	34,14	34,14	34,14	34,14	85,35	
Agua de diseño l/bolsa	409,86	409,86	409,86	409,86	409,86	409,86	409,86	409,86	2 049,30	
Agregado fino (kg)	674,82	674,82	674,82	674,82	674,82	674,82	674,82	674,82	3 374,10	
Agregado grueso (kg)	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	1 369,68	6 848,40	

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Absorción de agua:

Tabla 4. Velocidad de la absorción del agua en el concreto hidráulico

Elemento	Promedio absorción (g/s)	Desviación estándar (g/s)	Coefficiente variación (%)	Absorción corregida (g/s)
Muestra control	0,149	0,047	0,318	0,101
CC 1,5 % + RC 1,0 %	0,120	0,048	0,403	0,072
CC 3,0 % + RC 2,0 %	0,106	0,045	0,427	0,061
CC 4,5 % + RC 3,0 %	0,129	0,043	0,337	0,085
CC 6,0 % + RC 4,0 %	0,135	0,045	0,332	0,090

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 4 presenta los resultados de la variación de la velocidad de absorción de agua en el concreto hidráulico con ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC), denotando para la muestra control un valor de $0,101 \text{ g/s} \pm 0,047 \text{ g/s}$, la combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % alcanzó una absorción de $0,072 \text{ g/s} \pm 0,048 \text{ g/s}$, la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % obtuvo un absorción de $0,061 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$, la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % logró una absorción de $0,085 \text{ g/s} \pm 0,043 \text{ g/s}$, y la combinación CC 6,0 % + 4,0 % obtuvo un absorción de $0,090 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$, respectivamente.

El estudio realizado por Fernández-Torrez et al. (2022), demostró que la utilización de caucho de neumáticos dio lugar a una reducción de la absorción de agua del 2,72 %, 0,67 % y 0,55 %. Los resultados indican que el uso de materiales reciclados mejora la absorción de agua en diferentes porcentajes. El presente estudio logró con éxito una reducción de la porosidad en la absorción de agua de $0,061 \text{ g/s}$ utilizando una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 %. Esta mezcla en particular se considera la más favorable en términos de minimización de la velocidad de absorción de agua. Para incrementos mayores de CC y RC, la velocidad de absorción mostró una tendencia a aumentar.

3.2. Permeabilidad:

Tabla 5. Permeabilidad del concreto hidráulico

Tiempo $S^{0.5}$	MC 0,0 % (g/m ²)	CC 1,5 % + RC 1 % (g/m ²)	CC 3 % + RC 2 % (g/m ²)	CC 4,5 % + RC 3 % (g/m ²)	CC 6 % + RC 4 % (g/m ²)
60	497,98	76,02	36,97	304,63	341,79
104	700,94	237,86	187,12	506,66	542,31
120	761,49	294,83	230,88	566,83	602,10
134	820,34	345,38	276,53	620,78	655,48
147	991,81	416,49	327,84	694,53	728,86
294	1 429,99	826,19	723,20	1 116,49	1 147,61
509	1 790,08	1 260,04	1 123,66	1 489,03	1 517,32
588	1 829,50	1 301,72	1 145,16	1 526,19	1 554,30
657	1 865,91	1 333,79	1 174,09	1 517,51	1 601,83
882	1 873,64	1 421,69	1 340,20	1 586,17	1 613,71
930	1 874,59	1 431,12	1 358,12	1 587,87	1 615,41
975	1 876,66	1 435,08	1 357,18	1 589,00	1 616,54
1018	1 879,11	1 435,08	1 359,82	1 589,38	1 616,92
1060	1 879,11	1 435,08	1 359,82	1 589,38	1 616,92
Media (60 a 294)	867,09	366,13	297,09	634,98	669,69

Nota: Muestra Control (MC), Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 5 muestra los resultados de la permeabilidad mediante el ensayo de succión capilar. Los valores variables

en la curva ($S^{1/2}$) que representan las masas en g/m^2 , que es el valor del incremento de masa por unidad de área en dos

momentos diferentes: 60 y 294 horas. La muestra control alcanzó un valor promedio de 867,09 g/m², la combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % obtuvo un valor de 366,13 g/m², la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % alcanzó un valor de 297,09 g/m², la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % presentó un valor de 634,98 g/m², y la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % logró un valor de 669,69 g/cm², respectivamente.

Según Salih et al. (2022), se realizó una investigación del impacto de las cenizas volantes y microsílíce en la mejora de la capacidad de forma sofisticada. Los investigadores

observaron valores de permeabilidad del 33,3 %, 40 %, 47 % y 53,3 %, lo que demostró una influencia sustancial en la mejora de la capacidad de absorción de agua. En este estudio, la utilización de materiales reciclados demuestra una notable reducción de la permeabilidad cuando se usan materiales reciclados hasta una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 %. Asimismo, cuando se usan por encima de la mezcla óptima estos valores adoptan la forma de una línea creciente que se vuelve casi horizontal, lo que demuestra que la permeabilidad del concreto aumenta con el tiempo.

3.3. Resistencia a la compresión:

Tabla 6. Resistencia a la compresión del concreto hidráulico

Elemento	7 días					
	Resistencia rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-39 (kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	192,97	1,22	0,006	191,75	191,48	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	210,35	2,87	0,014	207,48	191,48	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	224,05	5,16	0,023	218,88	191,48	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	190,88	0,67	0,003	190,21	191,48	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	182,29	1,38	0,008	180,91	191,48	No
14 días						
Muestra control	241,21	0,53	0,002	240,67	239,22	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	260,50	1,90	0,007	258,60	239,22	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	277,44	3,06	0,011	274,38	239,22	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	235,17	0,99	0,004	234,19	239,22	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	225,38	2,27	0,010	223,12	239,22	No
28 días						
Muestra control	284,62	1,91	0,007	282,72	280,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	310,25	4,35	0,014	305,90	280,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	330,19	6,85	0,021	323,34	280,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	277,74	1,17	0,004	276,57	280,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	265,71	2,84	0,011	262,87	280,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 6 muestra los datos obtenidos de las variaciones en la resistencia a la compresión a las edades de 7, 14 y 28 días. La muestra control alcanzó valores de resistencia de $191,75 \pm 1,22$ kg/cm², $240,67 \pm 0,53$ kg/cm² y $282,72 \pm 1,91$ kg/cm². La combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % alcanzó resistencias de $207,48 \pm 2,87$ kg/cm², $258,60 \pm 1,90$ kg/cm² y $305,90 \pm 4,35$ kg/cm², la combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % obtuvo resistencias de $218,88 \pm 5,16$ kg/cm², $274,38 \pm 3,06$ kg/cm² y $323,34 \pm 6,85$ kg/cm², la combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % logró resistencias de $190,21 \pm 0,67$ kg/cm², $234,19 \pm 0,99$ kg/cm² y $276,57 \pm 1,17$ kg/cm², la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % alcanzó resistencias de $180,91 \pm 1,38$ kg/cm², $223,12 \pm 2,27$ kg/cm² y $262,87 \pm 2,84$ kg/cm², respectivamente.

Saad et al. (2020) afirmaron que el uso de un 20 % de humo de sílice y un 25 % de caucho permitió alcanzar resistencias a

la compresión para la muestra control de 330 y 445 Mpa y con las combinaciones obtuvieron 228 y 245 MPa. Según la norma ASTM C39 (2021), la resistencia mínima requerida para un diseño de 280 kg/cm² a los 7 días es de 191,48 kg/cm², a los 14 días 239,22 kg/cm² y a los 28 días 280 kg/cm². Sin embargo, la muestra control supera a la norma en un 0,14 % a los 7 días, 0,61 % a los 14 días y 0,97 % a los 28 días, la combinación de CC 1,5 % + RC 1,0 % supera en un 8,36 % a los 7 días, 8,10 % a los 14 días y 9,25 % a los 28 días, la combinación de CC 3,0 % + RC 2,0 % superan en un 14,31 %, 14,70 % y 15,48 % en los mismos intervalos de tiempo. El presente estudio alcanzó una mayor resistencia con el uso de la combinación de CC 3,0 % + 2,0 %, superando a la muestra control y a la norma ASTM C-39. De esta manera, se conduce a una disminución de la resistencia a la compresión cuando se utilizan cantidades superiores de la combinación óptima.

3.4. Resistencia a la Flexión:

Tabla 7. Resistencia a la flexión del concreto hidráulico 7 días

Elemento	7 días					
	Resistencia Rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-78 (Kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	29,06	0,17	0,006	28,89	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	30,32	0,12	0,004	30,19	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	31,35	0,04	0,001	31,32	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	26,83	0,25	0,009	26,58	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	24,78	0,35	0,014	24,43	28,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

Tabla 8. Resistencia a la flexión del concreto hidráulico 14 y 28 días

14 días						
Elemento	Resistencia Rotura (Kg/cm ²)	Desviación Estándar (Kg/cm ²)	Coefficiente Variación (%)	Resistencia Corregida (Kg/cm ²)	ASTM C-78 (Kg/cm ²) Resistencia Cumple...?	
Muestra control	30,80	0,12	0,004	30,68	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	32,59	0,16	0,005	32,43	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	33,39	0,16	0,005	33,23	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	27,64	0,42	0,015	27,22	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	25,52	0,36	0,014	25,16	28,00	No
28 días						
Muestra control	33,21	0,29	0,009	32,93	28,00	Si
CC 1,5 % + RC 1,0 %	35,14	0,12	0,004	35,02	28,00	Si
CC 3,0 % + RC 2,0 %	36,06	0,31	0,009	35,76	28,00	Si
CC 4,5 % + RC 3,0 %	27,76	0,32	0,011	27,45	28,00	No
CC 6,0 % + RC 4,0 %	25,92	0,36	0,014	25,56	28,00	No

Nota: Ceniza de Cartón (CC), Cerámico Reciclado (RC)

La Tabla 7 y la Tabla 8 presentan los datos de las variaciones de la resistencia a la flexión en tres intervalos de tiempo diferentes: 7, 14 y 28 días. La muestra control alcanzó una resistencia de $28,89 \pm 0,17$ kg/cm², $30,68 \pm 0,12$ kg/cm² y $32,93 \pm 0,29$ kg/cm². La combinación CC 1,5 % + RC 1,0 % obtuvo una resistencia de $30,19 \pm 0,12$ kg/cm², $32,43 \pm 0,16$ kg/cm², y $35,02 \pm 0,12$ kg/cm². La combinación CC 3,0 % + RC 2,0 % logró resistencias de $31,32 \pm 0,04$ kg/cm², $33,23 \pm 0,16$ kg/cm² y $35,76 \pm 0,31$ kg/cm². La combinación CC 4,5 % + RC 3,0 % alcanzó resistencias de $26,58 \pm 0,25$ kg/cm², $27,22 \pm 0,42$ kg/cm² y $27,45 \pm 0,32$ kg/cm², y la combinación CC 6,0 % + RC 4,0 % lograron resistencias de $24,43 \pm 0,35$ kg/cm², $25,16 \pm 0,36$ kg/cm² y $25,56 \pm 0,36$ kg/cm², respectivamente.

En su reciente estudio, Brahimi et al. (2022) examinaron la utilización de residuos que contienen material PET como sustituto del cemento. Los autores observaron que la incorporación de este material de desecho dio lugar a una mayor resistencia mecánica, atribuida a la dureza del material. Según la norma ASTM C78 (2022), el módulo de rotura de la resistencia de diseño 280 kg/cm² el 10 % es de 28 kg/cm² como mínimo estándar para las edades de 7, 14 y 28 días, la muestra control logro a superar con porcentajes de 3,18 %, 9,57 % y 17,59 %, la combinación de CC 1,5 % + RC 1,0 % superó en porcentajes de 7,84 %, 15,81 % y 25,07 %, la combinación de CC 3,0 % + RC 2,0 % superó en porcentajes de 11,85 %, 18,69 % y 27,70 % en los mismos intervalos de tiempo. La investigación de los autores y el presente estudio demuestran que el uso de materiales reciclados en cantidades cuidadosamente controladas tiene el potencial de hacer que el concreto hidráulico sea más resistente a la flexión, por lo que se consigue la mayor resistencia con la mezcla de CC 3,0 % y RC 2,0 %, a mayor cantidad de esta combinación la resistencia a la flexión del concreto tiende a disminuir.

3.5. Prueba estadística Anova:

Tabla 9. Anova – Ensayos físicos

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Absorción					
Entre grupos	0,021	4	0,005	3,844	0,006
Dentro de grupos	0,124	90	0,001		
Total	0,145	94			
Permeabilidad					
Entre grupos	2 877 079,82	4	719 269,954	2,593	0,045
Dentro de grupos	18 030 505,11	65	277 392,386		
Total	20 907 584,93	69			

Los resultados del estadístico de la prueba Anova, que se utilizó para contrastar los ensayos físicos (absorción y permeabilidad) que se hicieron en el concreto hidráulico, pueden verse en la Tabla 9. Se observó un nivel de significación de 0,006 para la prueba de absorción, mientras que se observó un nivel de significación de 0,045 para la prueba de permeabilidad. Estas cifras indican que los valores p-valué son inferiores al nivel alfa predeterminado de 0,05.

Tabla 10. Anova – Ensayos mecánicos

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Resistencia a la compresión						
7 días	Entre grupos	3395,516	4	848,879	73,104	0,000
	Dentro de grupos	116,12	10	11,612		
	Total	3511,636	14			
14 días	Entre grupos	5239,249	4	1309,812	226,06	0,000
	Dentro de grupos	57,941	10	5,794		
	Total	5297,19	14			
28 días	Entre grupos	8177,67	4	2044,417	86,317	0,000
	Dentro de grupos	236,849	10	23,685		
	Total	8414,519	14			
Resistencia a la flexión						
7 días	Entre grupos	85,232	4	21,308	301,527	0,000
	Dentro de grupos	0,707	10	0,071		
	Total	85,939	14			
14 días	Entre grupos	133,643	4	33,411	297,921	0,000
	Dentro de grupos	1,121	10	0,112		
	Total	134,764	14			
28 días	Entre grupos	246,213	4	61,553	483,124	0,000
	Dentro de grupos	1,274	10	0,127		
	Total	247,487	14			

El análisis estadístico, es decir, la prueba Anova, se llevó a cabo para examinar los resultados mostrados en la Tabla 10. Los valores significativos obtenidos tanto para la prueba de

resistencia a la compresión como para la prueba de flexión resultaron ser 0,000 para las edades de 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos son estadísticamente significativos, ya que se sitúan por debajo del nivel alfa de significación especificado ($p < 0,05$).

4. CONCLUSIONES

El estudio concluye que la velocidad de absorción de agua con el uso de cenizas de cartón (CC) y cerámica reciclada (RC) en concentraciones de CC 3,0 % y RC 2,0 % disminuye la porosidad en un promedio de $0,061 \text{ g/s} \pm 0,045 \text{ g/s}$ en comparación con la muestra control que alcanza $0,101 \pm 0,047 \text{ g/s}$, lo que se debe principalmente por la forma natural de los materiales. Igualmente, estas propiedades se pierden cuando se supera la mezcla óptima de CC 3,0 % y RC 2,0%, provocando mayor absorción capilar en el concreto. Esta conclusión y los resultados se apoyan en los datos mostrados en la Tabla 9 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,006, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05. En este contexto, la CC y la RC tienen efectos positivos sobre las propiedades físicas del concreto hidráulico, recomendándose el uso de estos materiales reciclados. La investigación concluye que la permeabilidad con el uso de ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC) de una combinación de CC 3,0 % y RC 2,0 % alcanzó un valor promedio de $297,09 \text{ g/m}^2$, presentando así una capacidad de permeabilidad reducida, lo que indica una permeabilidad relativamente baja en comparación con la muestra control que obtuvo $867,09 \text{ g/m}^2$. Del mismo modo, la entrada de los agentes que aceleran la velocidad de deterioro en el concreto hidráulico. La confirmación de esta conclusión se respalda con los datos de los resultados mostrados en la Tabla 9 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,045, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05. Así, se establece que el efecto sobre las propiedades del concreto hidráulico con el uso de CC y RC es favorable.

Se establece que la resistencia a la compresión con ceniza de cartón (CC) y Cerámico Reciclado (RC) de CC 3,0 % + RC 2,0 % alcanzó la mayor resistencia con un valor de $323,34 \text{ kg/cm}^2 \pm 6,85 \text{ kg/cm}^2$ después de un periodo de curado de 28 días, superando a la muestra control que obtuvo $282,73 \text{ kg/cm}^2 \pm 1,91 \text{ kg/cm}^2$ y a la norma ASTM C-39 con diseño establecido de 280 kg/cm^2 . Asimismo, cuando se utiliza mayor cantidad de materiales de CC y RC, la resistencia a la compresión tiende a disminuir. Estos resultados se respaldan con los datos mostrados en la Tabla 10 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un p-valor de 0,000, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05 para grupos a las edades de 7, 14 y 28 días. En consecuencia, se determina que el uso de materiales reciclados de CC y RC, tiene efectos significativos en las propiedades del concreto.

Se concluye que la resistencia a la flexión con ceniza de cartón (CC) y cerámico reciclado (RC) de CC 3,0 % y RC 2,0 % alcanzó la mayor resistencia de $35,76 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,31 \text{ kg/cm}^2$ después de un periodo de curado de 28 días, superando la muestra control que obtuvo $32,93 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,29 \text{ kg/cm}^2$ y a la norma ASTM C78 con una resistencia requerida de 28 kg/cm^2 . De esta forma, cuando se utiliza mayor cantidad de materiales

de CC y RC, la resistencia a la flexión tiende a reducirse. Además, esta conclusión y resultados alcanzados se respaldan con los datos mostrados en la Tabla 10 del análisis estadístico Anova-Varianza, que alcanzó un valor p de 0,000, inferior al nivel de significación predeterminado de alfa 0,05 para grupos a las edades de 7, 14 y 28 días. En este contexto, se infiere que la CC y la RC tienen efectos significativos sobre las propiedades del concreto hidráulico.

5. REFERENCIAS

- Abubakar Tadda, M., Ahsan, A., Imteaz, M., Shitu, A., Abdulkaki Danhassan, U., & Idris Muhammad, A. (2020). Operation and Maintenance of Hydraulic Structures. In *Hydraulic Structures - Theory and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91949>
- ACI PRC-522 R-10 American Concrete Institute. (2011). *Report on Pervious Concrete (Reapproved 2011)*. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=52210&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US AND METRIC
- ACI-211.1 American Concrete Institute®. (2002, August 9). *Diseño de mezclas Método ACI*. <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/metodo%20aci%20211?search=metodo%20aci%20211>
- Alhazmi, H., Shah, S. A. R., Anwar, M. K., Raza, A., Ullah, M. K., & Iqbal, F. (2021). Utilization of Polymer Concrete Composites for a Circular Economy: A Comparative Review for Assessment of Recycling and Waste Utilization. *Polymers*, 13(13), 2135. <https://doi.org/10.3390/polym13132135>
- Amin, M., Agwa, I. S., Mashaan, N., Mahmood, S., & Abd-Elrahman, M. H. (2023). Investigation of the Physical Mechanical Properties and Durability of Sustainable Ultra-High Performance Concrete with Recycled Waste Glass. *Sustainability*, 15(4), 3085. <https://doi.org/10.3390/su15043085>
- ASTM C33/CMMM-18. (2018, April 20). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. https://www.astm.org/c0033_c0033m-18.html
- ASTM C39/C39M-21. (2021, March 9). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html
- ASTM C78/C78M. (2022, March 30). *Standard Test for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. https://www.astm.org/c0078_c0078m-22.html
- ASTM C1585-20. (2020, September 22). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. <https://www.astm.org/c1585-20.html>
- ASTM D854-14. (2023, May 15). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (Withdrawn 2023)*. <https://www.astm.org/d0854-14.html>
- Barrios, A. M., Vega, D. F., Martínez, P. S., Atanes-Sánchez, E., & Fernández, C. M. (2021). Study of the properties of lime and cement mortars made from recycled ceramic aggregate and reinforced with fibers. *Journal of Building*

- Engineering*, 35, 102097. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102097>
- Brahimi, A., Meghachou, M., Abbad, H., Rahmouni, A., Chebout, R., Bachari, K., Zohra Zeggai, F., & Belbachir, M. (2022). Structural and Chemical Analysis of New Cement Based on Eggshells and Sand from Dunes (Southern West of Algeria) Stabilized by PET. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98346>
- de Matos, P. R., Sakata, R. D., Onghero, L., Uliano, V. G., de Brito, J., Campos, C. E. M., & Gleize, P. J. P. (2021). Utilization of ceramic tile demolition waste as supplementary cementitious material: An early-age investigation. *Journal of Building Engineering*, 38, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102187>
- Demissew Gashahun, A. (2022). Production of Sustainable Concrete by Using Challenging Environmentally Friendly Materials Instead of Cement. In *Sustainability of Concrete With Synthetic and Recycled Aggregates*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99239>
- Fernández-Torrez, L. A., Aquino-Rocha, J. H., & Cayo-Chileno, N. G. (2022). Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del residuo de caucho de neumático como reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(2), 52–65. <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.04>
- IRAM1871. (2021, April 6). *Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. 2da Edición. <https://catalogo.iram.org.ar/#/normas/detalles/9219>
- Li, L., Liu, Q., Huang, T., & Peng, W. (2022). Mineralization and utilization of CO₂ in construction and demolition wastes recycling for building materials: A systematic review of recycled concrete aggregate and recycled hardened cement powder. *Separation and Purification Technology*, 298, 121512. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121512>
- Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones E-107-200. (2016, May). *Manual de ensayo de materiales*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales>
- NTP 339.034. (2021, November 15). *CONCRETO. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo*. 5a Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- NTP 339.078. (2022, March 24). *Determinación de la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios de la distancia entre apoyos. Método de ensayo*. 4ª Edición. <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- Paul, S. C., Babafemi, A. J., Miah, M. J., Basit, M. A., Hasan, N. Md. S., & Kong, S. Y. (2022). Role of Sugarcane Juice as a Natural Admixture on Setting Time and Hardened Properties of Cementitious Materials. *Infrastructures*, 7(10), 145. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100145>
- Saad, B., Hameed, Z., & Khadary, F. (2020). Evaluate the performance of using new materials in rigid concrete pavement. *International Journal of Civil Engineering*, 7(9), 37–45. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I9P106>
- Sadagopan, M., Rivera, A. O., Malaga, K., & Nagy, A. (2023). Recycled Fine and Coarse Aggregates' Contributions to the Fracture Energy and Mechanical Properties of Concrete. *Materials*, 16(19), 6437. <https://doi.org/10.3390/ma16196437>
- Salih, M. A., Ahmed, S. K., Alsafi, S., Abullah, M. M. A. B., Jaya, R. P., Abd Rahim, S. Z., Aziz, I. H., & Thanaya, I. N. A. (2022). Strength and Durability of Sustainable Self-Consolidating Concrete with High Levels of Supplementary Cementitious Materials. *Materials*, 15(22), 7991. <https://doi.org/10.3390/ma15227991>
- Solahuddin, B. A., & Yahaya, F. M. (2021). Effect of Shredded Waste Paper on Properties of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682(1), 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012006>
- Zhang, P., Sun, X., Wang, F., & Wang, J. (2023). Mechanical Properties and Durability of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Polymers*, 15(3), 615. <https://doi.org/10.3390/polym15030615>

BIOGRAFÍAS



Hidráulica y Ambiental.

Bryan, Carpio, Bachiller de Ingeniería Civil. Experiencia en las Áreas de Ejecución de Obras y Mantenimiento, experto en Costos y Presupuestos. En la actualidad trabaja en la Empresa Montecristo Inversiones en el Área de Asistente Técnico de Obras. Sus intereses de Investigación se basan en la Ingeniería Civil,



Asesor, Revisor y Jurado de Tesis de Pregrado y Postgrado.

Abel, Muñiz, Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Civil, Doctor en Ciencias de la Educación, candidato a PhD en Recursos Hídricos (estudios concluidos), Docente Universitario con el dictado de cursos de Hidráulica, Hidrología e Investigación. Consultor de Proyectos de Ingeniería. Investigador del área de Hidráulica e Hidrología,

INDEXACIONES

Scopus®

SciELO

redalyc.org UAEM

latindex
catálogo
2.0

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

REDIB
Red Iberoamericana
de Innovación y Conocimiento Científico



REVISTA
POLITÉCNICA

MIAR
Matriz de Información para el
Análisis de Revistas

CiteFactor
Academic Scientific Journals

BASE
Bielefeld Academic Search Engine

Google
Scholar

revistapolitecnica.epn.edu.ec

Academic
Resource
Index
ResearchBib

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

Crossref
doi
DIGITAL
OBJECT
IDENTIFIER



REVISTA POLITÉCNICA



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL

ISSN: 1390-0129
eISSN: 2477-8990
Volumen 54, Nro. 1, Agosto · Octubre 2024



ESCUELA
POLITÉCNICA
NACIONAL



REVISTA
POLITÉCNICA



EPN
editorial

revistapolitecnica.epn.edu.ec
www.epn.edu.ec