

Revista INGENIERIA



Autoridades

Dr. Fernando Sempértegui Ontaneda, Ph.D.
Rector de la Universidad Central del Ecuador

Consejo Editorial

Ing. Flavio Arroyo Morocho, Ph.D., Editor, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Ing. Abel Remache Coyago, MSc., Editor Académico, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Mgs. Tatiana Freire, Dipl., Editor de Sección, Universidad Central del Ecuador, ECUADOR
Dr. Jhohannes Pittz, MA., MIB., Ph.D. (c), Miembro, EU Business School Munich, ALEMANIA
Dra. Teresa Magal-Royo, Ph.D., Miembro, Universidad Politécnica de Valencia, ESPAÑA
Dr. Andrés Vivas Albán, Ph.D., Miembro, Universidad del Cauca, COLOMBIA
Dr. Boris Heredia Rojas, Ph.D., Miembro, Universidad del Norte, CHILE
Dr. Jaime Duque Domingo, Ph.D., Miembro, Universidad de Valladolid, ESPAÑA
Dr. Giovanni Herrera Enriquez, Ph.D., Miembro, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, ECUADOR
Dr. José Luis Paz, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Jesús López Villada, Ph.D., Miembro, Universidad Internacional SEK, ECUADOR
Dr. Michel Vargas, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Andrés Robalino-López, Ph.D., Miembro, Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Dr. Kiyanoosh Golchin Rad, Miembro, Pukyong National University, SOUTH KOREA
Dr. Ali Bagheri Fard, Miembro, George Brown College, CANADÁ
Ing. Hamid Aadal, M.Sc., Miembro, Science & Technology Innovation-ADF, IRÁN
Dra. Esther Campos Serrulla, Ph.D., Miembro, Universidad Europea de Madrid, ESPAÑA
Dr. Alberto Sánchez, Ph.D., Miembro, Escuela de Ingenierías Industriales-UVA, ESPAÑA
Dra. Diana Ayala, Ph.D., Miembro, Universidad de Santo Tomás, COLOMBIA
Jaime Gómez García-Bermejo, Ph.D., Miembro, University of Valladolid, SPAIN

Consejo Asesor y Evaluador

Ing. Teddy Jhennse Negrete, MSc., Universidad Politécnica Salesiana UPS Sede Guayaquil, ECUADOR
Ing. Nelson Layedra, M.Sc., Escuela Politécnica del Litoral ESPOL, ECUADOR
Mayo. Juan Carlos Romero, Ph.D. (c), Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, ECUADOR
Mat. Holger Enrique Balseca, MSc. Investigador Independiente, ECUADOR
Ing. María Belén Correa, MSc., Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR
Ing. Brian Jordano Cagua, MDO, MSc, Ph.D. (c), Universidad de los Andes, CHILE
Ing. Luis Tenerife Hernández, Ph.D., Escuela Politécnica Nacional-EPN, ECUADOR
Ing. Rogger Peña Coronel, M.Sc., Instituto Superior Tecnológico Simón Bolívar ISTSB, ECUADOR
Ing. Eduardo José Cueva, MSc., Universidad Internacional del Ecuador UIDE, ECUADOR
Mtr. Javier Vera, Pontificia Universidad Católica del Ecuador PUCE, ECUADOR
Dis. Bolívar Chávez, MSc., Instituto Metropolitano de Diseño LA METRO, ECUADOR
Ing. Alvasazyazdi Mohammadfarid, Ph.D. (c), Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ULEAM, ECUADOR
Ing. Galo Andrés Flor, MBA, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ECUADOR
Ing. Henry Osorio, M.S.c., Universitario Rumiñahui ISTER, ECUADOR
Ing. Johanna Cristina Jara, MSc., Universitario Rumiñahui ISTER, ECUADOR
Ing. Fabricio Cedeño Castro, Mgs., Instituto Superior Tecnológico Simón Bolívar ISTSB, ECUADOR
Ing. Cristian Laverde, MS.c., Universidad Técnica Estatal de Quevedo UTEQ, ECUADOR
Ing. Germán Erazo, MS.c., Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ECUADOR
Dr. Pablo Jarrín Valladares, Instituto Nacional de Biodiversidad, ECUADOR
Dr. Héctor O. Salazar, Escuela Politécnica Nacional EPN, ECUADOR
Ing. Luis Xavier Orbea, MS.c., Universidad Técnica Estatal de Quevedo UTEQ, ECUADOR
Ing. Mario Alexander Peralvo, MS.c., Universidad Politécnica Salesiana UPS, ECUADOR

Este número estuvo bajo la coordinación editorial de: Tatiana Freire Rosero

Diseño de Portada:

Matheo Mena Taco, Ingeniería en Diseño Industrial, Universidad Central del Ecuador

Sitio web:

<http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/index>

Correo electrónico:

fing.revista.ingenio@uce.edu.ec

ISSN impresa 2588-0829

ISSN electrónica 2697-3243



Los contenidos pueden usarse libremente, sin fines comerciales y siempre y cuando se cite la fuente.
Si se hacen cambios de cualquier tipo, debe guardarse el espíritu de libre acceso al contenido.



Comentario a la situación actual sobre las lesiones por accidentes de trabajo en el sector de la construcción del Ecuador

Commentary on the Current Situation of Occupational Injuries in the Construction Sector in Ecuador

Antonio Ramón Gómez García [1](#) | [ID](#) Universidad Espíritu Santo, Guayaquil (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 07/11/2023

Aceptación: 31/01/2024

CARTA AL DIRECTOR

Estimado Dr. Flavio Arroyo Morocho
Editor de la Revista INGENIO

Por medio de la presente me permito comentar acerca del artículo “*Accidentabilidad laboral en el sector de la construcción: Ecuador, período 2016-2019*”, publicado en el volumen 4 del número 2 en la *Revista INGENIO*, referente a la accidentabilidad laboral en el sector de la construcción en el Ecuador [1]. Los autores centran su interés en abordar este problema de salud laboral y estoy de acuerdo con ellos en cuanto a la importancia de generar conocimiento al respecto. No obstante, se requiere del empleo de análisis más sólidos para abordar este fenómeno. Asimismo, es más apropiado utilizar los términos científicos “*siniestralidad laboral*” o “*accidentalidad laboral*” en lugar de “*accidentabilidad laboral*”. Cabe recordar que el análisis de los datos sobre seguridad y salud en el trabajo proporciona información útil para conocer el progreso o el deterioro del efecto de las condiciones de trabajo en la salud de los trabajadores [2]. Además, los resultados del análisis pueden ayudar a detectar poblaciones más vulnerables dentro de un mismo sector económico y servir de insumo para la formulación de políticas públicas en la materia. Para ello, no es especialmente recomendable analizar las cifras en frecuencias absolutas (n) y relativas (%n), ya que no proporcionan ninguna información más allá de la magnitud numérica [2]. Este aspecto se ha observado en el estudio mencionado [1], así como en otras investigaciones realizadas en el país [3] [4].

En este sentido y para extraer conclusiones más precisas de la realidad, se recomienda el empleo de indicadores epidemiológicos. Destacan, por su uso y aceptación internacional [5], las Tasas de Incidencia de lesiones por accidentes de trabajo según gravedad (Mortales y No mortales), durante un periodo de tiempo y considerando como denominador a la población expuesta o susceptible de sufrir lesiones. Para favorecer la interpretación del resultado de las tasas suelen expresarse mediante una base multiplicativa elegida ($\times 10^2$, $\times 10^3$... $\times 10^6$) [2]. También, como complemento al análisis de los datos, es de gran interés la estimación de la capacidad de producir la muerte. Es decir, la tasa de letalidad permite situar la proporción de accidentes de trabajo que resultaron mortales en relación al número de lesiones.

En muchas ocasiones, los investigadores deberíamos comunicar nuestros resultados a la sociedad. Para tal propósito, es importante utilizar un lenguaje cotidiano y accesible para que pueda ser entendido por un público más amplio, incluidos también los actores gubernamentales. Por ello, las imágenes, gráficos e infografías ilustrativas pueden ser de gran ayuda, ya que facilitan de manera visual la comprensión de los hallazgos más relevantes de la investigación. Para la elaboración de la siguiente infografía se han empleado los registros administrativos, más recientes y disponibles en el país, sobre las lesiones por accidentes relacionados o como consecuencia del trabajo (LAT) en el sector de la construcción. En concreto, los datos para el cálculo de las Tasas de Incidencia proceden de los Boletines Estadísticos del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social, que incluyen los procesos cerrados de calificación por lesiones (incapacitantes) y fallecidos entre los trabajadores protegidos por el Seguro General de Riesgos del Trabajo durante 2015 y 2022 [6]. Como denominador, se calculó el promedio anual de trabajadores del sector de la construcción (población expuesta) a través del Registro Estadístico de Empleo en la Seguridad Social, por tratarse de la información más exhaustiva y actualizada sobre el empleo registrado [7].

Durante el periodo comprendido entre 2015 y 2022, se calificaron un total de 5.101 LAT en el sector de la construcción. De estos, el 2,9% provocaron la muerte al trabajador afiliado. Esto se traduce en una Tasa de Incidencia promedio de periodo en 5,4 lesiones por cada 1.000 trabajadores y 1,7 fallecidos por cada 10.000 trabajadores.

En relación a la evolución y comportamiento de las Tasas de Incidencia por LAT, según se muestra en la Infografía, se pueden observar una tendencia a la disminución para las LAT No mortales desde el inicio de periodo hasta 2018. En 2019, se mantuvo estable en 4,7 lesiones por cada 1.000 trabajadores. En 2020, se produjo una reducción considerable en un -35,5% respecto al año anterior, para luego volver a incrementarse en los dos últimos años y alcanzar en 2022 cifras similares al año anterior a la pandemia de la COVID-19 (4,4 lesiones por cada 1.000 trabajadores). Por el contrario, la Incidencia por LAT Mortales muestra estabilidad, con una ligera disminución en 2020 (0,9 fallecidos por cada 10.000 trabajadores).

En términos de la capacidad de producir la muerte por la LAT, se observa un incremento de la letalidad desde el 2015 (2,2%) hasta el 2018 (4,7%), y cifras similares en los últimos años, sin mostrar variaciones significativas (3,3% en promedio, 2019-2022).

Por otro lado, al analizar la distribución por sexo, era esperado que los hombres representaran la mayoría de las LAT debido al predominio masculino en este sector económico, de hecho, acumulan un porcentaje del 96,4% del total y con una probabilidad de 4 veces más de sufrir un accidente de trabajo en comparación con las mujeres. En relación a la edad del trabajador afectado por LAT, los registros empleados sitúan a los trabajadores de entre los 35 a 44 años de edad como el grupo de mayor riesgo (6,2 lesiones por cada 1.000 trabajadores). Sin embargo, al comparar los cambios de las Tasas de Incidencia por LAT entre 2019 y 2022 se observan incrementos en los trabajadores más jóvenes (de 15 a 24 años) y de edad avanzada (65 y más años).

Estos nuevos resultados, a diferencia del estudio mencionado [1], muestran una situación más precisa sobre la problemática de la siniestralidad laboral para el sector de la construcción en el país. Por un lado, alertan sobre el posible incremento de la incidencia por LAT en los próximos años y, por otro lado, identifican a los trabajadores jóvenes y en edades avanzadas como los más vulnerables. Finalmente, la letalidad se ha mantenido constante durante el periodo; esto sugiere que los lugares de trabajo (obras de construcción) siguen siendo peligrosos para trabajar y deja en duda el compromiso y aplicación de la normativa en seguridad y salud en el trabajo [8].

Contribuciones de autoría

La carta ha sido elaborada por el autor basándose en el artículo publicado en la Revista INGENIO [1].

Conflictos de intereses

Ninguno.

Infografía 1

Situación actual sobre las lesiones por accidentes de trabajo en el sector de la construcción del Ecuador

Siniestralidad laboral en la Construcción: Ecuador



5,4

Tasa de LAT
No mortales

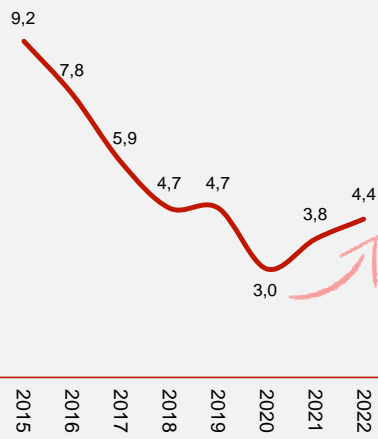


1,7

Tasa de LAT
Mortales

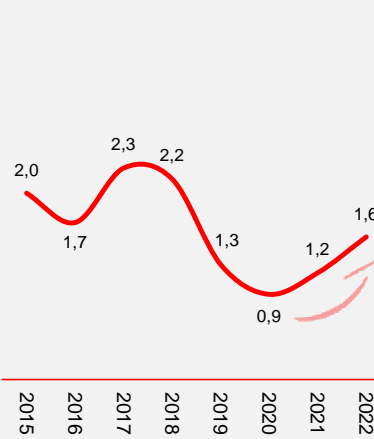
Tasa de Incidencia por LAT No mortales

(x1.000 trabajadores)



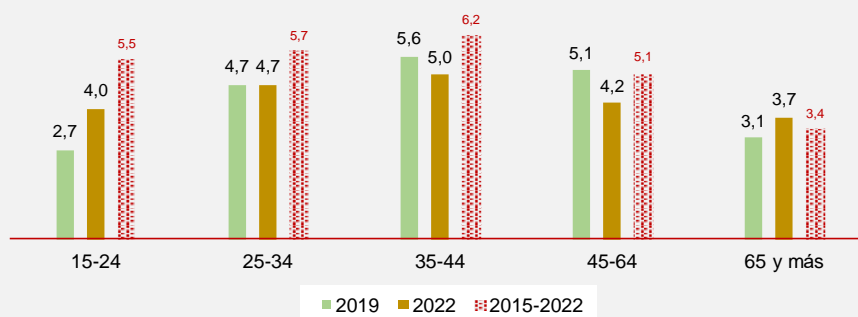
Tasa de Incidencia por LAT Mortales

(x10.000 trabajadores)



Comparación de la Tasa de Incidencia por LAT entre 2019 y 2022 según grupos de edad

(x1.000 trabajadores)



REFERENCIAS

- [1] K. Morales; G. Pacheco y L.P Viera. “Accidentabilidad Laboral en el Sector de la Construcción: Ecuador, período 2016-2019”, *INGENIO*, vol. 4, n.º 2, pp. 35–45, 2021.
- [2] Organización Internacional del Trabajo. (2021). “Guía rápida sobre fuentes y usos de estadísticas sobre seguridad y salud en el trabajo”. [Online]. Available: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/--stat/documents/publication/wcms_794841.pdf
- [3] M. Espinoza-Guano y J. Ramos-Guevara. “Análisis comparativo de la accidentabilidad laboral en Ecuador: periodo 2014 al 2019”, *Digital Publisher CEIT*, vol. 6, n.º 6, pp. 49–58, 2021.
- [4] M. Paguay; J.D. Febres y E. Valarezo. “Occupational Accidents in Ecuador: An Approach from the Construction and Manufacturing Industries”, *Sustainability*, vol. 15 n.º 16, 10.3390, 2023.
- [5] J. Takala; P. Hämäläinen; K.L. Saarela; L.Y. Yun; K. Manickam; T.W. Jin; P. Heng; C. Tjong; L.G. Kheng; S. Lim y G.S. Lin. “Global estimates of the burden of injury and illness at work in 2012”. *Journal of occupational and environmental hygiene*, vol. 11, n.º 5, pp. 326–337, 2014.
- [6] Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (2022). Boletines Estadísticos. [Online]. Available: <https://www.iess.gob.ec/es/web/guest/estadisticas>
- [7] Instituto Nacional de Estadística y Censos (2022). Registro Estadístico de Empleo en la Seguridad Social (REESS) [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmNmYjdiMTYtODE3Mi00YjMyLWI2NzAtYjIxZGRhZGMwOTIiIiwidCI6I6ImYxNThhMmU4LWNhZWVtNDQwNi1iMGFiLWY1ZTIiOwJkYTExMiJ9>
- [8] A.R. Gómez-García; M.L. Vega-Chica y J.A. García-Arroyo. “Relationship between the territorial distribution of labor inspectors and work accident injuries: Clustering Ecuadorian provinces into four management scenarios”. *Safety Science*, vol. 158, pp. 105956, 2023.



REVISTA INGENIO

Violencia en Ecuador: Análisis de Homicidios Mediante Series de Tiempo

Violence in Ecuador: Analysis of Homicides Through Time Series

Atal Kumar Vivas Paspuel, [1](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Santo Domingo (Ecuador)
David Alfredo Vivas Paspuel, [2](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador, Quito (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 8/5/2023
Recepción tras revisión:
29/9/2023 Aprobación:
30/10/2023 Publicación:
15/01/2023

PALABRAS CLAVE

Pronósticos, series de tiempo,
modelos, homicidios.

ARTICLE HISTORY

Received: 8/5/2023
Received after revision:
29/9/2023 Approved: 30/10/2023
Accepted: 15/1/2024

KEY WORDS

Forecasts, time series, models,
homicides.

RESUMEN

La violencia en Ecuador no tiene precedentes, los índices de homicidios, femicidios, robos, atentados y otros tipos de crímenes han aumentado de forma alarmante en este país. Todos los días se reportan nuevos eventos que son noticia y alarman a la comunidad. Las instituciones gubernamentales junto con la organización policial y las fuerzas militares realizan acciones para mitigar la ola de violencia sin alcanzar resultados eficientes. Este trabajo analiza la cantidad de homicidios a nivel nacional como una serie temporal con el fin de conocer el comportamiento de esta variable en los últimos años. Aplicando modelos de suavizado, así como el modelo ARIMA y Red Neuronal se busca el modelo más eficiente que minimice el error de predicción. Entre los modelos de suavizado se encontró al modelo de Holt como el más eficiente, sin embargo, pero al comparar todos los modelos aplicados, se encontró que el modelo de Red Neuronal es el más eficiente con el cual se pueden obtener buenos pronósticos.

ABSTRACT

Violence in Ecuador is unprecedented, the rates of homicides, femicides, robberies, attacks and other types of crimes have increased alarmingly in this country. Every day new events are reported that are news and alarm the community. Government institutions, together with the police organization and the military forces, carry out actions to mitigate the wave of violence without achieving efficient results. This paper analyzes the number of homicides nationwide as a time series to know the behavior of this variable in recent years. Applying smoothing models, as well as the ARIMA and Neural Network models, the most efficient model is sought. that minimizes the prediction error. Among the smoothing models, the Holt model was found to be the most efficient, however, but when comparing all the applied models, it was found that the Neural Network model is the most efficient with which good forecasts can be obtained

1. INTRODUCCIÓN

El año 2022 ha sido considerado uno de los más violentos de la historia de Ecuador. Según la policía nacional, se registraron al menos 4.539 muertes violentas que se dieron en diferentes circunstancias como sicariatos, homicidios, femicidios, robos con asesinato o actos criminales con explosivos. En términos de la tasa de muertes delincuenciales, este dato equivale a 25,5 muertes por cada 100.000 habitantes en 2022. Haciendo una comparación respecto al año anterior, se observa un crecimiento abrupto en esta tasa ya que para el 2021 se registraron 2.048 crímenes, lo que significan 13,7 muertes por cada 100.000 habitantes. Las autoridades de seguridad están de acuerdo en que es la tasa más alta de la historia desde que se tienen registros sobre muertes delincuenciales [1].

Las razones para la escalada de violencia en el país son de variado orden. Se conoce que el crimen organizado

transnacional crece, se perfecciona en su logística y comunicación y se despliega de forma acelerada. Se conoce la asociación que existe entre estas organizaciones y el estado desde hace varios años. La tecnificación y globalización del comercio a nivel internacional ha hecho que el crimen tenga más facilidades para los flujos ilícitos a través de las fronteras (Crimen organizado cadenas de valor). La disputa entre organizaciones criminales es otra razón para el incremento de crímenes. Las bandas se enfrentan por mantener el mando en las cárceles del Ecuador y por lo tanto, los principales centros de privación de libertad del país han sufrido a la par el aumento en la violencia interna, llevando a las autoridades a soportar una crisis de críticas y demandas [2]. Bajo estas circunstancias, se vuelve necesario conocer el problema a través de la información recabada en los eventos violentos. Los recuentos de estos eventos por mes pueden ser útiles para realizar predicciones por medio de

series de tiempo. Los pronósticos en series de tiempo por medio de un modelo adecuado proporcionan un estimado cuantitativo en un marco de probabilidad para eventos futuros. Es importante incorporar este tipo de pronósticos para el recuento de crímenes ya que las autoridades requieren información que les permita organizar hacia el futuro la logística que implica contener los hechos violentos [3]. Este trabajo realiza un análisis de la serie de tiempo construida con los recuentos de homicidios y femicidios desde enero 2014 hasta enero 2022. Esta serie de tiempo es analizada mediante varios modelos de pronósticos: modelo de medias móviles, modelo exponencial simple, modelo de Holt, modelo de Holt Winters, ARIMA y Red Neuronal. Estos modelos cuentan con su formulación y sus parámetros asociados. El paquete computacional Statgraphics se utiliza para los modelos de medias móviles, exponencial simple, modelo de Holt y modelo de Holt Winters (llamados también modelos de suavizado), mientras que los modelos ARIMA (Autorregresive Integrated Moving Average) y Red Neuronal se aplican mediante el software R. El error cuadrático medio (RMSE), el Error Absoluto Medio (MAE) y el Error Absoluto Porcentual Medio (MAPE) se usarán como estadísticos de comparación para rescatar el mejor modelo.

2. MÉTODO

Una serie de tiempo es una sucesión de datos: $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots$, sobre una variable particular y que son tomados a través del tiempo. Es decir, es una secuencia ordenada de observaciones sobre alguna variable de interés. Las series más usuales son las univariantes, es decir, que miden tan solo una variable a través del tiempo, sin embargo, los análisis pueden extenderse a más variables. Los modelos utilizados para el manejo de las series son variados, en este trabajo se utilizan los métodos de suavizado, que permiten controlar el ruido o las fluctuaciones aleatorias que dificultan la interpretación de la serie o modelos como el ARIMA y el modelo de Red Neuronal.

Suponiendo que la serie de datos se puede descomponer en: tendencia, ciclo, estacionalidad e irregularidad, se afirma que la serie es el resultado de la suma de los componentes teóricos:

$$Y_t = T_t + S_t + C_t + I_t \quad (1)$$

La tendencia de una serie T_t , es aquella parte de la serie que describe los cambios de la variable a largo plazo, es decir, representa el crecimiento o caída de la serie a través de un período amplio en el tiempo. La parte estacional S_t , define un patrón de cambio que se encuentra dentro el periodo de un año y para su detección del patrón estacional, suelen usarse métodos multiplicativos o aditivos. La parte cíclica C_t , llamado también efecto cíclico, se determina como una

fluctuación que se relaciona con la tendencia y que tiende a repetirse durante periodos mayores a un año. Suele ser difícil establecer modelos cíclicos debido a la inestabilidad que estos presentan. La parte irregular de la serie de tiempo se determina como un factor residual, es el resto de la serie luego de sumar las tres primeras componentes, por lo tanto, puede definirse también como la parte aleatoria.

La media de la serie se define como el valor constante en el tiempo alrededor del cual evoluciona la serie. La varianza es el valor que mide la dispersión o variabilidad de la serie alrededor de su media. La autocorrelación se define como la medida de la relación existente entre dos observaciones consecutivas de la serie, es decir separadas por un periodo temporal que también se denomina retardo. Para el caso de los modelos ARIMA, suele suponerse que la serie cumple la hipótesis de estacionariedad. Esta suposición implica consideraciones de tipo estocástico sobre la media y varianza de la serie.

2.1 Modelo de medias móviles

Una de las formas de suavizar una serie es por medio del método de las medias móviles que se basa en el cálculo de una media para valores vecinos de la serie de forma consecutiva [4]. Por lo tanto, podemos tomar una cantidad de los datos de la serie y promediarlos y así construir una nueva serie suavizada correspondiente. En nuestro caso utilizamos una media móvil para 5 puntos, es decir, la primera media, es el promedio entre x_1, x_2, x_3, x_4 y x_5 , la segunda media será el promedio entre x_2, x_3, x_4, x_5 y x_6 , y así sucesivamente. Se puede ponderar la información aplicando pesos a cada observación, el promedio sería:

$$\begin{aligned} & \text{Promedio móvil ponderado} \\ & = \sum_{i=1}^n c_i x_i \end{aligned} \quad (2)$$

donde $0 \leq c_i \leq 1$, entonces c_i es la proporción asignada a x_i . Por lo tanto, $\sum_{i=1}^n c_i = 1$.

2.2 Modelo exponencial simple

Cuando se requiere predecir valores a futuro para una serie, podemos pensar en utilizar muchos valores rezagados o simplemente tomar en cuenta el ultimo o los últimos valores recabados. El método de suavizado es una solución intermedia entre estos extremos, es decir, realiza un pronóstico basado en una media ponderada de los valores actuales y de los pasados [5]. El cálculo de esta media dará más peso a la última observación, menos peso al valor inmediatamente anterior, y así sucesivamente hacia atrás. Representando esto en una ecuación tenemos:

$$\hat{x}_t = (1 - \alpha)x_t + \alpha(1 - \alpha)x_{t-1} + \alpha^2(1 - \alpha)x_{t-2} + \dots \quad (3)$$

En esta ecuación, α es un valor entre 0 y 1.

2.3 Modelo de Holt

Este modelo se considera como un mejoramiento al modelo exponencial simple al agregar un parámetro al modelo, por lo que se lo puede definir como modelo exponencial doble. Por lo tanto, los dos parámetros ahora son α y β . El modelo queda como sigue

$$x_{t+m} = \alpha z_t + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}) + m[\beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}] \quad (4)$$

En donde, α y β son parámetros que están entre 0 y 1. La constante α es relativa al modelo de suavizado exponencial simple. La constante β es la constante de suavizado de la tendencia de la serie.

2.4 Modelo de Holt-Winters

Este modelo, a diferencia de los anteriores, añade una componente de estacionalidad que puedan presentar los datos de la serie. Por lo tanto, este modelo presentará y dependerá de 3 parámetros [5]: α , β y γ en sus ecuaciones. Siendo z_{t+m} la variable alisada al tiempo $t + m$, la podremos calcular mediante

$$\hat{z}_{t+m} = (s_t + mb_t)E_{t+m}, \text{ en donde}$$

$$s_t = \alpha \frac{z_t}{E_{t-s}} + (1 - \alpha)(s_{t-1} + b_{t-1}) \quad (5)$$

$$b_t = \beta(s_t - s_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad (6)$$

$$E_t = \gamma \frac{z_t}{s_t} + (1 - \gamma)E_{t-s} \quad (7)$$

2.5 Modelos ARIMA

El modelo ARIMA se aplica a series de tipo estacionarias. Una serie estacionaria es aquella cuyos valores y propiedades no dependen del tiempo en el que se encuentra la serie. Por ejemplo, si una serie posee tendencias o estacionalidad, no es estacionaria, pero una serie de ruido blanco es estacionaria ya que en cualquier tiempo debería verse igual. Para obtener una serie estacionaria a partir de series no estacionarias, suele realizarse una diferenciación entre observaciones consecutivas [6]. Un modelo autorregresivo es aquel que usa observaciones pasadas combinadas linealmente para realizar predicciones a futuro. La autorregresión significa que el modelo se basa en la regresión de la variable con ella misma.

Al combinar un modelo autorregresivo con uno de medias móviles, se genera el modelo ARIMA. Es decir, si combinamos la diferenciación con la autorregresión y un modelo de media móvil, obtenemos un modelo ARIMA no estacional. ARIMA es un acrónimo de Media Móvil Integrada Autorregresiva. Se dice que tenemos un modelo ARIMA(p,d,q) donde:

p, es el orden autorregresivo del modelo.

d, grado de la diferenciación involucrada en el modelo.

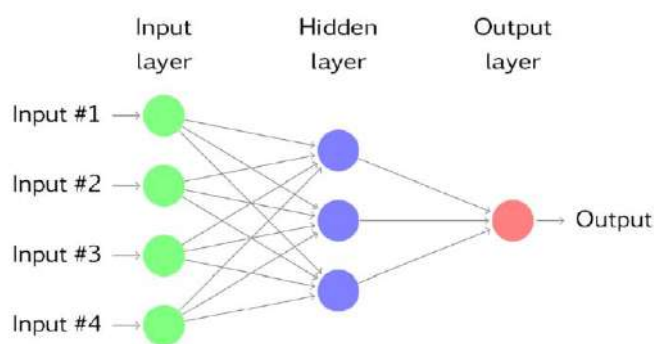
q, orden de la media móvil del modelo.

2.6 Modelo de Redes Neuronales

Estas redes constituyen métodos de pronóstico basadas en métodos matemáticos que copian la actividad del cerebro. Pueden modelar relaciones no lineales y relaciones complejas entre la variable de respuesta y sus predictores [5]. La red neuronal es una red de "neuronas" que se organizan mediante capas. Las entradas son los predictores y las salidas son los pronósticos. Todo esto está organizado mediante capas inferiores, superiores e intermedias [7].

Figura 1

Estructura básica de una red neuronal.



Para series de tiempo, los valores retrasados de la serie pueden servir como entradas para una red neuronal, a esto lo llamamos autorregresión de red neuronal o modelo NNAR (Neural Network Autoregression). Usamos la notación NNAR(p,k) para indicar que hay p entradas y k nodos retrasados en la capa oculta. Por ejemplo, un modelo NNAR(9,5) usa las últimas nueve observaciones utilizadas como entradas para pronosticar la salida y con cinco neuronas en la capa oculta. El paquete *Forecast* de R implementa el modelo de redes neuronales de alimentación hacia adelante que contiene una sola capa oculta y las entradas son los *lags* o retrasos de la serie. Estos insumos le permiten al modelo realizar pronósticos para las series temporales univariadas. En R, la red implementada tiene una sola capa oculta y la cantidad de entradas depende de la cantidad de rezagos que tienen los datos [8]. En R usamos la función *nnetar()* para aplicar el modelo.

El modelo matemático puede ser escrito como $y_t = f(\mathbf{y}_{t-1}) + \varepsilon_t$, donde $\mathbf{y}_{t-1} = (y_{t-1}, y_{t-2}, y_{t-2}, \dots)$ es el vector que contiene los valores rezagados de la serie en análisis y f representa la red neuronal. Se asume que el error de la serie $\{\varepsilon_t\}$ es homocedástico y normalmente distribuido. Se puede simular muestras futuras de este modelo de forma iterativa, generando aleatoriamente un valor para ε_t , por medio de la distribución normal o de una nueva muestra de los valores históricos. Entonces, si ε_{T+1}^* es una muestra de la distribución de los errores al

tiempo $T + 1$, entonces $y_{T+1}^* = f(y_T) + \varepsilon_{T+1}^*$ es una posible muestra de la distribución de predicciones para y_{T+1} . Así que es posible simular iterativamente las predicciones requeridas. Al simular repetidamente muestras, se puede conocer la distribución de las predicciones en función de la red neuronal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestra en primer lugar la serie de observaciones para la variable Homicidios Intencionales (Absolutos) tomados del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) desde enero 2014 hasta mayo 2022 con frecuencia mensual en Ecuador [9]. El número de observaciones es 101 y el periodo es mensual.

Tabla 1

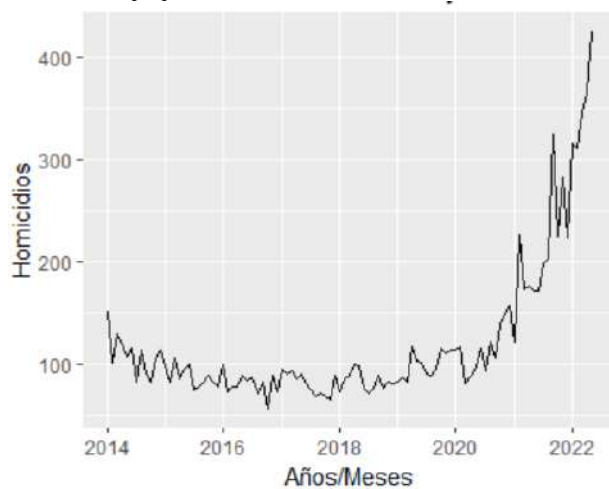
Datos de homicidios absolutos a nivel nacional en Ecuador.

Mes	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Enero	151	98	99	95	73	83	113	122	315
Febrero	101	82	73	90	86	87	116	226	311
Marzo	129	106	78	93	89	83	80	173	344
Abril	120	85	77	86	99	117	88	176	365
Mayo	107	95	89	90	98	102	96	172	424
Junio	115	100	84	80	76	101	115	171	
Julio	82	75	87	75	71	90	94	198	
Agosto	114	78	72	68	76	89	122	203	
Septiembre	90	82	82	71	89	95	105	325	
Octubre	82	89	56	69	76	115	138	225	
Noviembre	106	82	89	65	82	111	148	282	
Diciembre	113	78	73	88	80	114	157	223	

Una primera visualización de la serie se muestra en la Fig. 2, la cual evidencia el crecimiento de muertes que ha sufrido el país por causas del crimen. Podemos ver una leve caída desde el 2014 hasta el 2020 y desde este punto se dispara el número de casos hasta el 2022. Se espera, según la tendencia, que la variable siga creciendo en los siguientes periodos de tiempo.

Figura 2

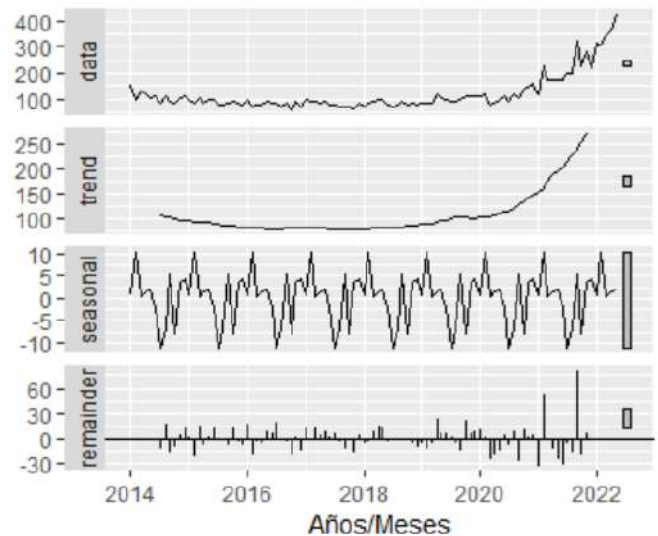
Serie de tiempo para homicidios absolutos



La descomposición de la serie en sus componentes de tendencia, estacional, cíclica e irregular la podemos ver como modelo aditivo en la Fig. 3. Podemos ver que no se trata de una serie estacionaria, al no tener varianza constante y tener una tendencia bien marcada.

Figura 3

Descomposición aditiva para la serie de datos.



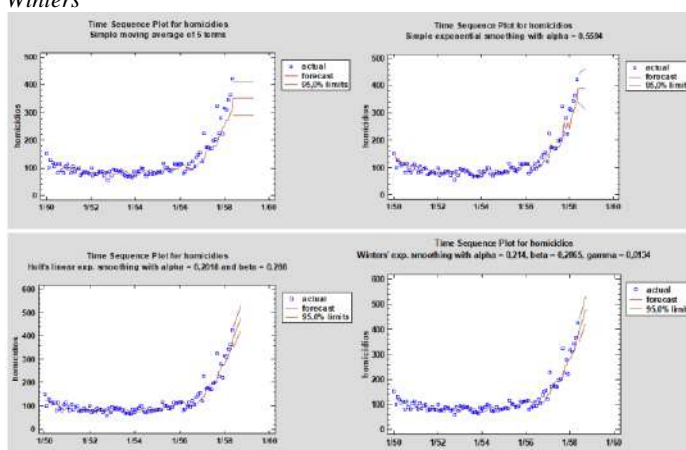
Para mostrar los resultados de los modelos de medias móviles, exponencial simple, Holt y Holt Winters, se utilizó el software Statgraphics, un software estadístico estándar, cuya virtud es mostrar los resultados de forma amigable incluso para investigadores que no tienen conocimientos estadísticos. Una ventaja es la omisión del uso de programación para la obtención de resultados personalizados dirigido a personas que no tengan grandes conocimientos de estadística, además de no utilizar programación y, por tanto, simplificar el trabajo.

Para esto, dispone del intérprete StatAdvisor que permite interpretar estadísticamente los resultados de los modelos

utilizados en los análisis, lo cual ayuda si no se tienen conocimientos suficientes de estadística.

Los resultados para los modelos de medias móviles, exponencial, Holt y Holt Winters pueden verse en la Fig. 4. Para cada modelo, la línea roja marca las predicciones calculadas, al final se realizan varias predicciones. Para los modelos de medias móviles y exponencial simple se puede observar que las predicciones a futuro se comportan como una recta horizontal constante, es decir, se tienen las mismas predicciones. Esto se debe al hecho de que estos dos modelos no toman en cuenta características como la tendencia de los datos. Los modelos de Holt y Holt Winters si toman en cuenta estas características de la serie, esto implica que su modelo depende de una mayor cantidad de parámetros y su ventaja es que las predicciones mejoran, reduciendo el error de predicción. Los parámetros α , β y γ para estos modelos son optimizados por el paquete Statgraphics.

Figura 4
Pronósticos para los modelos de media móvil, exponencial, Holt y Holt Winters



La Tabla 2 muestra los errores de predicción para cada uno de los modelos de suavizado. Los errores considerados son: RMSE, MAE y MAPE. Podemos ver que, para todos los estadísticos de error, el modelo Holt obtiene los valores más bajos. por lo que puede ser considerado el más eficiente en este grupo. Los parámetros: α , β y γ fueron optimizados mediante Statgraphics, de modo que se minimicen los errores.

Tabla 2
Comparación de errores para los modelos de suavizado

Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Parámetros
Medias Móviles	28,7255	17,5535	13,2376	términos = 5
Exponencial	25,3336	15,9956	12,3626	alpha = 0,563
Holt	22,5778	15,0606	12,3494	alpha = 0,211, beta = 0,275
Holt Winters	22,9257	15,1591	12,4563	alpha = 0,214, beta = 0,286, gamma = 0,013

Para los modelos ARIMA y Redes Neuronales hemos realizado un análisis separado dado que sus técnicas son diferentes a los primeros modelos y relativamente son modelos más actuales. En la Tabla 3 podemos ver la comparación de errores para estos modelos, el modelo de Redes Neuronales presenta los valores más bajos con respecto al modelo ARIMA y al resto de modelos, por lo

que puede ser considerado el más eficiente. Para estos dos modelos hemos utilizado el software R. Para el caso de ARIMA, R optimiza los parámetros p, d y q. Para el caso de Red Neuronal, R trabaja internamente en el modelo. En nuestro caso, $p=100$ y $k=1$, es decir que la red será alimentada mediante 100 rezagos y por defecto, R trabaja con una sola capa oculta.

Tabla 3
Comparación de errores para los modelos ARIMA y Red Neuronal

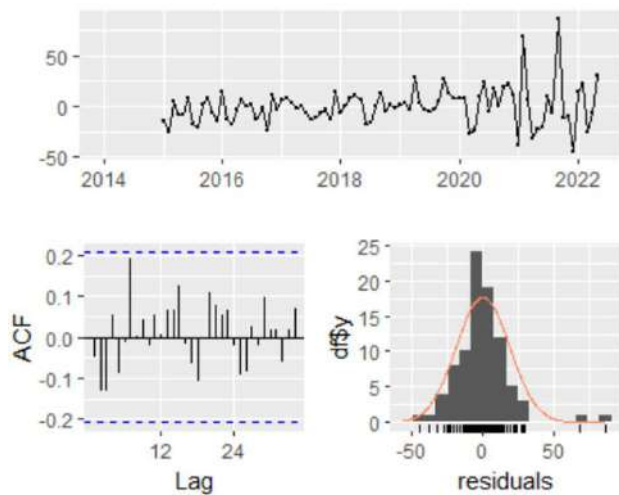
Modelo	RMSE	MAE	MAPE	Parámetros
ARIMA	20,529	13,569	11,383	$p = 2, d = 2, q = 3.$
Red Neuronal	18,668	12,935	11,090	$p=100, k=1$

El análisis de los residuos es importante para conocer el comportamiento de la serie de tiempo una vez que se aplica un modelo. La Fig. 5 muestra el comportamiento de los residuos para la serie de tiempo, sus autocorrelaciones y la distribución de estos.

Podemos ver que las autocorrelaciones se encuentran entre los límites permitidos y que la distribución parece tener media cero. Esto lo podremos corroborar en las pruebas de hipótesis correspondientes.

Figura 5

Residuales para el modelo de Redes Neuronales. Modelo NNAR(2,1,2).



La indicación NNAR(2,1,2) es una especificación de hiperparámetros para el modelo NNAR. Los números entre paréntesis representan los valores de los hiperparámetros del modelo: "2" se refiere al número de capas ocultas en la red neuronal, "1" se refiere al número de neuronas en la capa oculta. "2" se refiere al retraso máximo en el modelo autorregresivo.

Ruido Blanco

Para probar la existencia de ruido blanco lo hacemos por medio de la prueba de Ljung-Box cuyas hipótesis dicen lo siguiente:

H₀: Hipótesis Nula (existe ruido blanco)

H₁: Hipótesis alternativa (no existe ruido blanco)

Por medio del software R se obtuvo un $p\text{-value} < 2.2e-16$, por lo tanto, podemos concluir que se rechaza H₀, es decir que los residuos no se comportan como ruido blanco.

Media nula.

Para verificar si los residuos tienen media nula, podemos realizar la prueba de hipótesis sobre la media:

Las hipótesis serían:

H₀: $\mu = 0$ (Media Nula)

H₁: $\mu \neq 0$ (Media no Nula)

Mediante el software R se obtuvo un $p\text{-value} = 0.9904$, entonces, no se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, la media de los residuos es estadísticamente cero.

Varianza constante

Para determinar si existe varianza constante hemos realizado la prueba de McLeod-Li que consiste en una prueba de heterocedasticidad condicional autorregresiva para una serie de tiempo. Las hipótesis son

H₀: No existe heteroscedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) entre los rezagos considerados.

H₁: Existe heteroscedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) entre los rezagos considerados.

Dado que se trata de una prueba múltiple, el resultado es una gráfica que muestra los $p\text{-values}$ en una sola gráfica. Por tanto, habría que observar cuantos de estos valores están por debajo de la línea de color rojo y ver si estos son suficientes para rechazar la hipótesis nula. En la Fig.6 (Anexo Fig.6) podemos ver que la mayoría de las marcas están por encima de la línea de color rojo por lo que no podemos rechazar H₀, es decir que existe heteroscedasticidad condicional autorregresiva (ARCH) entre los rezagos considerados.

Los residuos siguen una distribución normal

Se realiza la prueba de Shapiro - Wilk a los residuos para conocer si se distribuyen normalmente, las hipótesis son:

H₀: La variable presenta una distribución normal

H₁: La variable presenta una distribución no normal
Mediante el software R, se obtiene que $p\text{-value} = 2.601e-05$, con lo cual los residuos no siguen una distribución normal.

4. CONCLUSIONES

Se han aplicado los modelos de suavizado para el tratamiento de la serie de tiempo: medias móviles, exponencial simple, Holt y Holt Winters. Estos modelos permiten describir en forma general el comportamiento de la serie temporal pero no siempre las predicciones son las más eficientes. Para estos modelos, los errores más bajos fueron obtenidos por el modelo de Holt, RMSE = 22,5778, MAE = 15,0606 y MAPE = 12,3494. Estos modelos se aplican Cuando las series son muy irregulares, suele aplicarse modelos deterministas que suavizan la forma de la serie y nos permite realizar una mejor interpretación visual de la misma. Sin embargo, estos modelos no son tan eficientes al realizar pronósticos por lo que, dependiendo de las aplicaciones, podrían aplicarse modelos alternativos. Los modelos deterministas que se aplican son: Medias móviles con 5 elementos, Exponencial simple, Holt y Holt Winters.

Para analizar series de tiempo es importante analizar los residuos del modelo ya que nos permite conocer la eficiencia y en que magnitud se ha capturado las

características de los datos de la serie. Para que el ajuste del modelo sea eficiente, los residuos deberían: a) Presentar una baja autocorrelación o autocorrelación parcial ya que la presencia de correlación, indica que el modelo ha perdido alguna información de los datos. Hemos usado una prueba Ljung-Box para determinar si los residuos están realmente correlacionados y se encontró que nuestra serie efectivamente presenta autocorrelación. b) El promedio de los residuos debe ser nula, si esto no se cumple, estaremos ante un resultado sesgado de los pronósticos. Para nuestro caso, esto se cumplió satisfactoriamente. c) Los residuos deberían presentar varianza constante, en este trabajo se utilizó la prueba de McLeod-Li que consiste en una prueba de heterocedasticidad condicional autorregresiva para una serie de tiempo y se concluye que existe presencia de heterocedasticidad.

Realizar predicciones sobre series temporales no es una tarea fácil. La razón radica en que las observaciones de una serie temporal dependen casi solo de sus valores pasados y esta dependencia tiene un valor que es más alto cuando se trata de observaciones recientes y más bajo cuando se trata de observaciones lejanas en el tiempo.

Los modelos ARIMA se preocupan de hacer que una serie se vuelva estacionaria y para esto realizan diferentes técnicas como la diferenciación de la serie. Para medir el grado de estacionariedad, se preocupan de medir las autocorrelaciones de la serie, de modo que se obtenga una serie sin tendencia y varianza constante en la que se puedan realizar predicciones de mejor manera. También se realiza una diferencia estacional para eliminar justamente la estacionalidad de la serie. El paquete R permite realizar una optimización en este sentido al calcular el mejor modelo ARIMA.

Las redes neuronales son parte de las nuevas tendencias que tienen que ver con el aprendizaje de máquinas y la inteligencia artificial. En este sentido al utilizar una red neuronal como modelo para realizar predicciones en una serie de tiempo, la red utiliza los datos como entradas al modelo y el modelo calcula las correspondientes salidas que irán a nuevas entradas y con esto se construyen las capas de la red. Esto hace que la red aprenda de los datos que ingresan en las entradas y se obtenga una salida de aprendizaje que trate de minimizar los errores de predicción. En nuestro caso, hoy el modelo que obtuvo el valor más bajo de error RMSE es justamente el modelo de redes neuronales.

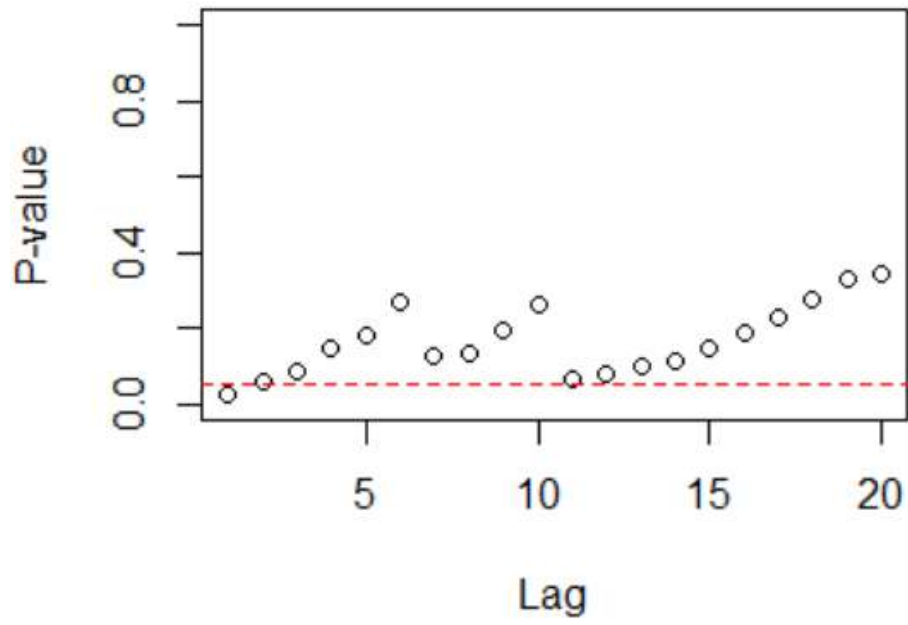
REFERENCIAS

- [1] S. Ortiz (22, Dic 29) “Ecuador cierra el 2022 con la peor tasa de homicidios de la historia.” <https://www.expreso.ec/actualidad/ecuador-cierrano-tasa-homicidios-25-5-peor-historia-145484.html> (accessed May 07, 2023).
- [2] A. L. Santillán Molina *et al.*, “Drogas, tráfico y crimen organizado como detonante de actos violentos en las cárceles del Ecuador,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 3, pp. 478–486, 2022, Accessed: May 07, 2023. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&id=S2218-36202022000300478&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- [3] A. C. Juárez, C. A. Zuñiga, J. L. M. Flores, and D. S. Partida, “Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos,” *Estudios Gerenciales*, vol. 32, no. 141, pp. 387–396, doi: 10.1016/J.ESTGER.2016.11.002.
- [4] D. R. (David R. Anderson, D. J. Sweeney, and T. A. Williams, “Estadística para negocios y economía,” p. 1080, 2012.
- [5] R. J. Hyndman, “Forecasting: Forecasting: Principles & Practice,” no. September, p. 138, 2014, Accessed: May 07, 2023. [Online]. Available: robjhyndman.com/uwa%5Chttp://robjhyndman.com/papers/forecasting-age-specific-breast-cancer-mortality-using-functional-data-models/
- [6] S. Siami-Namini and A. S. Namin, “Forecasting Economics and Financial Time Series: ARIMA vs. LSTM,” Mar. 2018, Accessed: May 07, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1803.06386>
- [7] Z. Pala and R. Atici, “Forecasting Sunspot Time Series Using Deep Learning Methods,” *Sol Phys*, vol. 294, no. 5, pp. 1–14, May 2019, doi: 10.1007/S11207-019-1434-6/METRICS.
- [8] A. DE Técnicas Económicas Y and A. Ramón Chung Pinzás, “APLICACIÓN DE TÉCNICAS ECONÓMICAS Y MACHINE LEARNING PARA SERIES DE TIEMPO UNIVARIADAS EN UNA ESCUELA PROFESIONAL DE UNA UNIVERSIDAD PÚBLICA,” *Veritas*, vol. 23, no. 1, pp. 47–51, Jan. 2023, doi: 10.35286/VERITAS.V23I1.335.
- [9] INEC, “Justicia y crimen” <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/justicia-y-crimen/> (accessed May 07, 2023).

Anexo

Figura 6.

Los p-valores para la prueba de McLeod-Li.





REVISTA INGENIO

Development of a Raspberry Pi-Based Wireless Educational Tool

Desarrollo de una Herramienta Educativa Inalámbrica Basada en Raspberry Pi.

Hólger Jorge Santillan Carranza [1](#) | [ID](#) Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Gran Canaria (España)

Jairo Oliver Enriquez Sandoval [2](#) | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)

Jose Fernando Bonilla Castro [3](#) | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)

ARTICLE HISTORY

Received: 06/08/2023
Received after revision: 10/10/2023
Approved: 25/11/2023
Accepted: 15/01/2023

KEY WORDS

Raspberry Pi, Educational Tool, Automation, user-friendliness.

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 06/08/2023
Recepción tras revisión: 10/10/2023
Aprobación: 25/11/2023
Publicación: 15/01/2023

PALABRAS CLAVE

Raspberry Pi, Herramienta Educativa, Automatización, Facilidad de Uso.

ABSTRACT

The following document introduces a wireless connectivity device specifically designed for the educational sector, employing IoT technology and Raspberry Pi. Its primary objective is to offer educational institutions an affordable solution that enables seamless classroom presentations without compromising on quality and user-friendliness. Using an experimental methodology, we configure a Raspberry Pi single-board computer, transforming this device into a practical alternative to a traditional desktop computer. This setup enables the playback of various document types, including Word, Excel, PowerPoint, and Publisher, offering educators and students a versatile tool to meet their academic requirements. The proposed solution operates seamlessly: through the use of a free mobile application, content can be effortlessly streamed to external devices, such as projectors, televisions, and monitors. This addresses an educational issue where the primary drawback lies in the cost of the equipment. Ultimately, the aim is not only to overcome financial barriers in education but also to ignite innovative exploration in enhancing connectivity and automation across diverse settings.

RESUMEN

El siguiente documento presenta un dispositivo de conectividad inalámbrica diseñado específicamente para el sector educativo, que emplea tecnología IoT y Raspberry Pi. Su objetivo principal es ofrecer a las instituciones educativas una solución asequible que permita realizar presentaciones en el aula sin problemas y sin comprometer la calidad ni la facilidad de uso. Utilizando una metodología experimental, configuramos un ordenador monoplaca Raspberry Pi, transformando este dispositivo en una alternativa práctica a un ordenador de sobremesa tradicional. Esta configuración permite la reproducción de varios tipos de documentos, incluidos Word, Excel, PowerPoint y Publisher, ofreciendo a educadores y estudiantes una herramienta versátil para satisfacer sus necesidades académicas. La solución propuesta funciona a la perfección: mediante el uso de una aplicación móvil gratuita, los contenidos pueden transmitirse sin esfuerzo a dispositivos externos, como proyectores, televisores y monitores. De este modo se aborda un problema educativo cuyo principal inconveniente radica en el coste de los equipos. En última instancia, el objetivo no es sólo superar las barreras financieras en la educación, sino también impulsar la exploración innovadora para mejorar la conectividad y la automatización en diversos entornos

1. INTRODUCTION

The internet has gained immense significance and has become indispensable in various domains, including education, employment, communication, entertainment, and more. A vast portion of the global population now enjoys access to a pervasive system of information and connectivity [1]. The public's growing demand for increased advancements, innovations, and assistance through this expansive platform in their daily lives has driven extensive research in science and technology. These efforts have yielded remarkable achievements, such as the emergence of the Internet of Things (IoT) [2].

IoT involves the interconnection of physical-world objects via the internet, equipped with sensors, actuators, and communication technology. The primary objective of this technology is to develop practical, groundbreaking applications while enhancing existing ones [3].

Hence, in accordance with the previously mentioned objectives, this endeavor is focused on creating a wireless connectivity apparatus tailored specifically for the educational sector [4]. It leverages IoT technology and the Raspberry Pi to furnish educational institutions

with a cost-effective solution. This solution enables the seamless display of presentations in classrooms without sacrificing quality or user-friendliness. Moreover, through the utilization of a complimentary mobile application, content can be effortlessly transmitted to external devices such as projectors, televisions, and monitors [5].

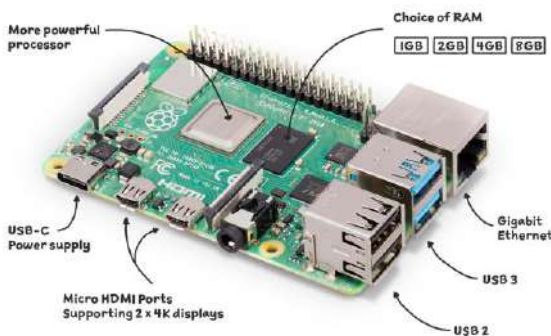
Modern educational approaches have evolved significantly over time. While traditional tools like books, blackboards, and flipcharts remain relevant, technology and the internet have emerged as indispensable resources. This is primarily due to the vast wealth of bibliographic sources available and the inclusion of visual aids, which greatly enhance the quality of contemporary education and facilitate more engaging and effective learning experiences across age groups [6]. In fact, these resources have become integral components of essential educational tools for institutions today [7].

Elaborated upon specific components

Projector: This device plays a crucial role in receiving video signals and displaying images on a surface. Its significance is particularly pronounced in educational contexts, where its utilization is geared towards enhancing the educational experience, fostering interactive and engaging teaching methods.

Raspberry Pi 4 Model B: The Raspberry Pi represents a family of single-board computers (SBCs) initiated by the Raspberry Pi Foundation, aimed at promoting affordable computer science and electronics education. Since its introduction in 2012, the Raspberry Pi has left a profound mark across diverse domains, including education, research, DIY project development, and the creation of inventive technology solutions [8] [9]. Fig. 1.

Figure 1
Raspberry Pi 4 model B



Note: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Specifications of the Raspberry Pi 4 model B are:

- System-on-a-chip: Broadcom BCM2711
- CPU: 1.5 GHz quad-core processor with Cortex-A72 arm
- GPU: Video Core VI
- Memory: 1/2/4GB LPDDR4 RAM
- Connectivity: 802.11ac Wi-Fi / Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet
- Video & Sound: 2 x micro-HDMI ports supporting 4K@60Hz displays via HDMI 2.0, MIPI DSI display port, MIPI CSI camera port, 4-pole stereo output and composite video port.
- Ports: 2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0
- Power: 5V/3A via USB-C, 5V via GPIO header
- Expansion: 40-pin GPIO header

VNC (Virtual Network Computing): VNC is a remote desktop system that relies on the RFB (Remote Frame Buffer) protocol, facilitating the remote control of a computer system [10].

- Facilitates screen sharing among users
- Enables cross-platform compatibility
- Utilizes lightweight protocols
- Operates as a standalone platform

Its architectural structure, is rooted in a client-server model, where the computer running the client application assumes control over the computer running the server application [11].

VNC utilizes a dedicated frame buffer aligned with the RFB protocol to manage client requests [12].

Once it receives a request for a screen refresh, the server captures the screen content from the frame buffer.

The server processes and transmits the captured screen image data, along with frame buffer update details, to the client. Subsequently, the user decodes and updates the bitstream accordingly [13].

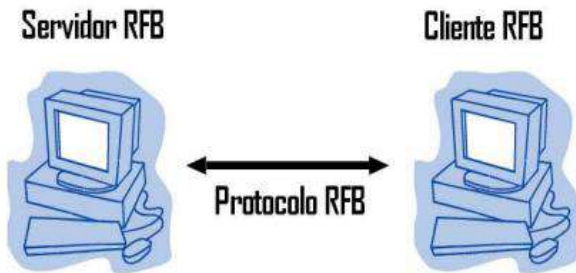
RFB (Remote Frame Buffer): The communication protocol designed for remote access to a basic user interface represents a technology enabling users to establish remote connections to and manage a system or application. Its architecture is rooted in the "frame buffer" class, making it especially well-suited for the efficient transmission of graphical data [13].

This protocol functions within a client-server framework [14]. The RFB client is the computer or any compatible device establishing a connection with the RFB server.

Once the connection is established, the user gains access to the window system and applications hosted on the server. Fig. 2.

Figure 2

Client-server model.



Debian: This is an open-source software initiative that continues to be actively maintained, even though it has been around for a while. Some users may find it a bit challenging, leading to misconceptions that it is primarily used by hackers, but this perception is entirely inaccurate [15]. Debian offers highly user-friendly tools designed for both system administrators and regular users. One notable advantage is its unwavering commitment to being entirely free [16].

TCP (Transmission Control Protocol): This protocol is universally recognized by all devices [17]. It is designed to establish a dependable connection, accepting a data stream within local processes, breaking it down into segments not exceeding 64 Kbytes, and transmitting each segment as a separate IP datagram. Upon reception, the data is then reconstructed [18].

2. METHOD

Employing an experimental approach, we undertake the configuration of a Raspberry Pi single-board computer, effectively converting it into a pragmatic substitute for conventional desktop computers. This reconfiguration empowers the device to support the playback of an array of document formats, encompassing Word, Excel, PowerPoint, and Publisher. As a result, educators and students gain access to a versatile tool tailored to fulfill their diverse academic needs. The proposed solution seamlessly operates through the utilization of a cost-free mobile application, allowing for effortless content streaming to external devices like projectors, televisions, and monitors.

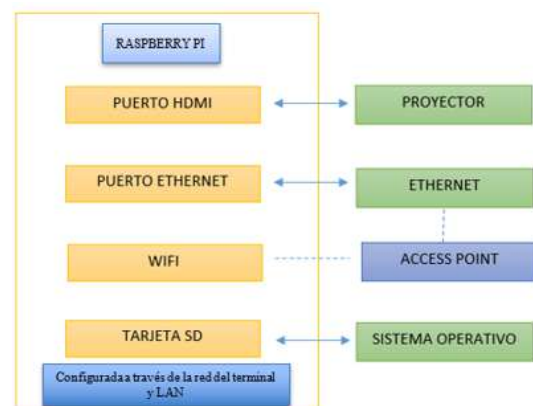
This innovative solution directly addresses a prevalent issue within the realm of education, primarily characterized by the formidable cost of requisite equipment. By simplifying the transition to Raspberry Pi-based systems and their compatibility with the Raspberry Pi single-board computer, this initiative aims to bridge the financial gap and facilitate more accessible and interactive learning environments. It paves the way for affordable, high-quality classroom presentations, ushering in an era of heightened connectivity, automation, and learning enhancement across various educational settings.

The suggested system has been meticulously planned and organized into a framework consisting of three core components. Fig. 3.

1. Raspberry Pi Connectivity.
2. HDMI facilitates the high-quality transmission of data for audio and video, ensuring exceptional clarity.
3. Internet Access.
4. This involves utilizing either a wireless connection or an Ethernet connection to establish network connectivity. Enabling WIFI on the Raspberry Pi can be achieved by following the specified procedure, enabling the transfer of files to the Pi.
5. Application Management.
6. The installed operating system provides the ability to navigate and control various applications seamlessly.

Figure 3

Architecture of the proposed system.



Raspberry Pi HDMI Connectivity: To implement the proposed system, Raspberry Pi provides 2 micro-HDMI ports for connecting to a projector. In cases where the

projector lacks an HDMI port, an HDMI to VGA converter can be used.

Installation of the Operating System: The process of installing the operating system on a Raspberry Pi is made effortless with the Raspberry Pi Imager. This powerful tool streamlines the formatting of the SD card and the loading of the latest OS version, significantly expediting the entire procedure [19].

Network Connectivity and Power Supply: The system is equipped with a 5V to 3A power supply featuring a USB Type-C connector and an Ethernet input for establishing an internet connection through an Ethernet cable. Furthermore, it offers the flexibility of connecting via WIFI, as this model includes WIFI capabilities [9].

Operating System Update: To perform a system update, two commands are necessary:

- Utilize `sudo apt-get update`
- Execute `sudo apt-get upgrade`

Establishing a Connection Between a Mobile Device/Laptop and Raspberry Pi: VNC is a pre-installed program, and to activate it, you can run the command `sudo raspi-config`. Navigate to "Interfacing Options," locate and select "VNC-Yes." To view your smartphone's screen, you'll need to enable USB debugging on your mobile device. In this process, access your Android device's settings, search for "additional settings," and choose "developer options." In that menu, enable "USB debugging."

SCRCPY Installation: Install SCRCPY to mirror your cellphone's screen by connecting the mobile device to the Raspberry Pi using a USB cable. Once connected, you can take full control of the Android device using your keyboard and mouse [20].

Wireless Connection: To establish a wireless connection, execute commands that activate the TCP/IP protocol on the device. Open the console terminal and enable the TCP/IP port with the command "adb tcpip 5555." Then, execute the command "adb connect 192.168.xx.xx:5555" to connect to the Android device. Upon execution, you will see the message "already connected."

Equations for Calculating System Bandwidth

Equation 1: Bandwidth Utilization = Data Transfer Rate × Transfer Duration (1)

The volume of data transferred is measured in various units, including bits, kilobits, or megabits.

The time elapsed is expressed in seconds, minutes, or hours, depending on the required level of precision.

The formulas outlined in the paper titled "Assessing Average Throughput for Data Stream Quantity in an NDN Rendezvous Server" provide a comprehensive method for computing the average throughput of packets transmitted within a system [21]. This calculation approach is straightforward and effective in estimating bandwidth utilization within a system operating at a specific data transfer rate over a defined time interval.

The system's transmission rate exhibits a direct correlation and is based on an optimal route forwarding strategy, taking into account factors such as the speed of interest, data rates (250 m/s), and data mobility. This strategy is applied in the context of data content streams, with lengths ranging from 100 to 1500 bytes [22].

$$DIFS = SIFS + (2 * RT) \quad (2)$$

$$TME = \frac{VGM}{2} * RT \quad (3)$$

$$MPDU = 1400 + UDP + NDN header + MAC header \quad (4)$$

$$TTP = expenses generated by physical layer + MPDU / (Data Rate) \quad (5)$$

$$Expenses generated physical layer + \frac{ACK packet size}{ACK transmission rate} \quad (6)$$

$$ATC = TS_{ACK} + TSC + ABT + DIFS \quad (7)$$

$$Average Throughput = \frac{Application Load}{Average Time Per Content} \quad (8)$$

Where:

- RT , Time slot (μs).
- $DIFS$, space distributed between frames (μs).
- VGM , Minimum congestion window (slots).
- TME , Average waiting time (μs).
- $MPDU$, Maximum size of a data packet unit (*bytes*).
- TTP packet transmission time (μs).
- TS_{ACK} , *Tiempo de transmision ACK*, measured in (μs).
- TSC , Content Send Time, refers to the period of time it takes to transmit data or information from a source to a destination over a communication network.
- ABT , Mean Wait Time, refers to the average time a message, signal or data packet must wait on a network before being transmitted or delivered to

its destination.

- ACK packet size, the size of the ACK packet can be quite small, typically measured in bytes.
- Average throughput, refers to the average throughput over a given time interval.
- Application load, refers to the amount of network traffic generated or received by the application.
- ATC, Average time per content measured in (μs).

Installing Raspberry Pi OS using Raspberry Pi Imager

The Raspberry Pi, being an integrated computer with limited memory, necessitates the use of a storage device, such as an SD card, to install an operating system that aligns with the hardware's functional specifications, for instance, Raspbian.

Raspberry Pi Imager

Raspberry Pi Imager stands as a robust tool meticulously designed to simplify the process of installing an operating system on a Raspberry Pi. This user-friendly application facilitates both the formatting of the SD card and the seamless loading of the latest OS version, significantly expediting the entire setup.

To get started, you can easily download the Raspberry Pi Imager from the official website and proceed with its installation. Subsequently, connect an SD card reader to your computer, select the desired card for the OS installation, and you'll be up and running with your Raspberry Pi promptly, all without unnecessary complications or concerns regarding the intricacies of OS installation [23].

Once the OS is successfully installed on the SD card, the initial configuration process will commence. Fig. 4. During this configuration, you can enable various settings at the time of installation, including:

Hostname: pi. Enable SSH

Configure the username and password (pi user by default), configure the Wi-Fi (SSID: **TelecoTT1 Password: xxxxxxxx**). Configure local (**Europe/Madrid and keyboard: es**).

Figure 4

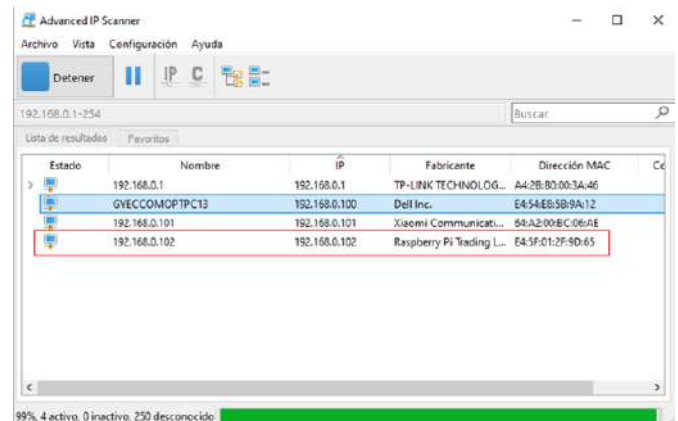
Menú selección SO.



After installation, you'll need to identify the IP address of the Raspberry Pi for establishing a connection. To accomplish this task, IpScan is employed. Fig. 5.

Figure 5

IpScan detecting Wifi equipment.



Establish a SSH connection using PuTTY over port 22 with the following credentials. Fig. 6.

Username: pi

Password: passwd (default). Exhibit Fig. 6.

Afterward, you will be prompted to update the password. Upon successfully connecting to the system, perform the following updates:

- sudo apt-get update
- sudo apt-get upgrade

Installation of VNC:

While in the console, you should enable VNC (which comes pre-installed) to connect to the desktop and proceed with the installation from the remote desktop. To do this, run the command: `sudo raspi-config`, navigate to Interfacing Options, and locate VNC. Then, select 'Yes' to enable it. Fig. 7.

Download and install VNC Viewer on your device and connect it to the Raspberry Pi.

In the accompanying illustrations, you can observe the login process for accessing the Raspberry Pi through VNC, allowing you to view the desktop and access its various options. Exhibit Fig. 7.

Installation of PiKISS:

Execute the following command: `curl -sSL https://git.io/JfAPE | bash`

Upon completion of the installation, you will find the launcher available in the System Tools menu. Exhibit Fig. 8.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Launch the PiKISS application to access the menu. From there, navigate to the "Others" category, and select the option for "Display and control of connected Android devices.". Exhibit Fig. 9.

To view your mobile screen, you need to enable USB debugging on your phone. In this process, you access the settings of your Android device, look for the additional settings option, and select the developer options. In that menu, you choose USB debugging.

Connect your mobile device to the Raspberry Pi using a USB cable. Once the connection is established, you can have complete control over the Android device using the keyboard and mouse.

On the Android device, access the Wi-Fi settings and choose the network you are connected to while verifying the IP address. Execute the command "`adb connect 192.168.65.191:5555`" to establish a connection with the Android device. Once executed, it will confirm the connection with the message "already connected."

To establish a wireless connection, execute the commands to enable the TCP/IP protocol on the device. Open the console terminal and activate the TCP/IP port using the command: "`adb tcpip 5555`."

Open Sercpy as usual without requiring the use of a USB cable, and you will be able to view the screen of the device. Exhibit Fig. 10.

The research project represents a significant step towards addressing the educational disparities that exist in underprivileged schools and institutions. Education is a fundamental right, and access to quality educational tools should not be limited by economic constraints. By focusing

on the development of a Raspberry Pi-based wireless educational tool, this project seeks to democratize access to technology-enhanced learning experiences.

The creation of a customized application designed to facilitate seamless connections and content sharing across multiple mobile devices is a pivotal aspect of this initiative. The goal is to empower educators and students with a user-friendly platform that enables them to collaborate, share resources, and engage in interactive learning activities. Such an application can bridge the digital divide, making advanced educational tools accessible to even the most resource-constrained environments.

However, as this research project progresses towards implementation, one crucial consideration is the existing network infrastructure's ability to handle the anticipated surge in data traffic. The deployment of this application will likely lead to increased demands on the network, requiring a thorough evaluation of its capacity. In cases where the current infrastructure falls short, proactive steps must be taken to enhance it. This could involve upgrading network hardware, expanding bandwidth, or implementing quality of service measures to ensure uninterrupted data flow.

In essence, this research project not only embodies the spirit of technological innovation but also emphasizes the importance of equitable educational opportunities. By providing a cost-effective and scalable solution for underprivileged schools and institutions, it aims to pave the way for a more inclusive and enriching learning experience, ultimately contributing to narrowing the educational gap and fostering a brighter future for all.

The Raspberry Pi operates on a 5V and 3A power supply, which furnishes the required energy for its smooth operation and execution of tasks. It's worth emphasizing that an alternative power source, like a portable battery, can also be used, provided that it aligns with the specific device requirements. The article titled "Power Consumption of the Raspberry Pi: A Comparative Analysis" [23] offers a comprehensive response to the intriguing question regarding the power consumption of Raspberry Pi. The study outlines various scenarios and conducts an intricate examination of power usage in each scenario. As detailed in Exhibit Fig. 11, the research concludes that the average power consumption of Raspberry Pi devices stands at 3.5 watts. Furthermore, the study undertakes a comparative assessment between Raspberry Pi and other devices, such as desktop computers and laptops, enabling an evaluation of the advantages that Raspberry Pi presents when compared to these alternative solutions.

Table 1 exhibits a dataset that has been generated from a sample of 22 observations. These observations were collected over a time span starting from time $t=0$ seconds and concluding at $t=0.12$ seconds. Throughout this timeframe, there was an exchange of data packets occurring between devices, specifically between Raspberry Pi and an Android device, and vice versa. These exchanges were executed using the Transmission Control Protocol (TCP). The recorded values represent the sizes of these transmitted

packets, ranging from 0 to 1514 bytes. Even when considering the original byte values, it is noteworthy that the size of these packets remains within a range that is well within the typical capabilities of network connections. This suggests that the existing network infrastructure is more than capable of efficiently managing the volume of data transmitted during each exchange, which is crucial for ensuring a seamless and uninterrupted communication experience.

Table 1

Data transmission sampling while watching a YouTube video.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length
1	0.000000	192.168.200.10	192.168.200.20	TCP	54
2	0.014968	192.168.200.20	192.168.200.10	VNC	83
3	0.015039	192.168.200.10	192.168.200.20	TCP	54
4	0.054056	192.168.200.10	192.168.200.20	VNC	1514
5	0.054077	192.168.200.10	192.168.200.20	VNC	1514
6	0.054080	192.168.200.10	192.168.200.20	VNC	1514
7	0.054083	192.168.200.10	192.168.200.20	VNC	165
8	0.057637	192.168.200.20	192.168.200.10	TCP	60
9	0.057735	192.168.200.20	192.168.200.10	TCP	60
10	0.058951	192.168.200.20	192.168.200.10	VNC	86
11	0.058972	192.168.200.10	192.168.200.20	TCP	54
12	0.071930	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	90
13	0.109987	192.168.200.5	192.168.200.10	TCP	1034
14	0.110007	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	78
15	0.116741	192.168.200.5	192.168.200.10	TCP	90
16	0.116753	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	66
17	0.117359	192.168.200.5	192.168.200.10	TCP	1474
18	0.117371	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	66
19	0.121368	192.168.200.5	192.168.200.10	TCP	1474
20	0.121381	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	66
21	0.121395	192.168.200.5	192.168.200.10	TCP	1474
22	0.121403	192.168.200.10	192.168.200.5	TCP	66

4. CONCLUSIONS

The proposed system represents a valuable solution for enhancing the efficiency of knowledge transmission within educational settings. It achieves this by replacing traditional computers with a Raspberry Pi while harnessing wireless technologies like SCRCPY, thereby creating an effective tool that optimizes teaching delivery in classrooms.

Moreover, it facilitates the seamless presentation of various content types, such as text, PDF files, presentations, and even videos, in an efficient and fluid manner. The incorporation of SCRCPY activates a TCP/IP protocol that simplifies the display of mobile

device screens on the Raspberry Pi, ensuring a smooth and high-quality transmission. This functionality grants educators the flexibility to wirelessly share content with students, eliminating the need for cables or physical connections.

The proposed design offers versatility by allowing the use of a USB cable to connect the Raspberry Pi to the projector when Wi-Fi connectivity is unavailable. This guarantees reliable transmission, even in environments with limited wireless network infrastructure.

Furthermore, the proposed system not only benefits economically disadvantaged educational institutions but also provides an accessible solution for households

lacking access to computers, offering an alternative solution within their homes. By overcoming budget constraints and limited access to advanced technology, it creates a pathway for effective knowledge transmission both within classrooms and households.

Finally, demonstrations through bandwidth consumption confirm that the Raspberry Pi and Android system combination is an optimal design. It exhibits qualities and capabilities comparable to those of a conventional computer, all without the need for substantial expenditure. These findings also lay the foundation for future research aimed at further enhancing this innovative design.

REFERENCES

- [1] B. Rodríguez Gaona, “Recursos Educativos Abiertos (REA) y el aprendizaje de la matemática,” *Tesla Revista Científica*, vol. 2, no. 1, pp. 72–89, Jan. 2022, Available: <https://doi.org/10.55204/trc.v2i1.19>
- [2] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 03, no. 05, pp. 164–173, 2015, Available: <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- [3] M. P. Gazzola, M. R. Otero, V. C. Llanos, “Uso de TIC en el contexto de una enseñanza basada en la investigación,” *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, no. 25, pp. 31–38, 2020. Available: <https://doi.org/10.24215/18509959.25.e03>
- [4] B. Yulianto, R. Layona, and L. C. Dewi, “A low-cost wireless multi-presentation on single screen in classroom using Raspberry Pi,” *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies*, vol. 12, no. 3, pp. 23–33, Jul. 2017, Available: <https://doi.org/10.4018/IJWLTT.2017070102>
- [5] S. Karthikeyan, B. N. Dharani, M. Vijayakarthish, T. Ravi, and R. Narmadha, “Raspberry PI Based Smart Projector,” in *ICPECTS 2020 - IEEE 2nd International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems*, Proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020., Available: <https://doi.org/10.1109/ICPECTS49113.2020.9336997>
- [6] Masaquiza Jerez, Tupac Amaru, Palacios Ocaña, Adrián Marcelo, & Moreno Gavilanes, Klever Armando. (2020). Gestión Administrativa y ejecución presupuestaria de la Coordinación Zonal de Educación - Zona 3. *Revista Científica UISRAEL*, 7(3), 51-65. Available: <https://doi.org/10.35290/rcui.v7n3.2020.305>
- [7] T. Madrid Tamayo, “Revista Andina de Educación, El sistema educativo de Ecuador: un sistema, dos mundos,” *Revista Andina de Educación*, vol. 2, no. 1, pp. 8–17, 2019, Available: <https://doi.org/10.32719/26312816.2019.2.1.2>
- [8] S. Karthikeyan, B. N. Dharani, M. Vijayakarthish, T. Ravi and R. Narmadha, "Raspberry PI Based Smart Projector," 2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2020, pp. 1-7, Available: <https://doi.org/10.1109/ICPECTS49113.2020.9336997>.
- [9] Stan Kurkovsky and Chad Williams. 2017. Raspberry Pi as a Platform for the Internet of Things Projects: Experiences and Lessons. In *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE '17)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 64–69. Available: <https://doi.org/10.1145/3059009.3059028>
- [10] “Jolle W. Jolles. 2021. Broad-scale applications of the Raspberry Pi: A review and guide for biologists, Available: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13652>
- [11] W. Gay, “The Raspberry Pi,” in *Advanced Raspberry Pi*, Apress, 2018, pp. 1–13, Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3948-3_1
- [12] S. Patel, C. Salazar, K. K. Patel, S. M. Patel, and P. G. Scholar, “Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges,” *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016, Available: <https://doi.org/10.4010/2016.1482>
- [13] Chun-ying Huang, Yun-chen Cheng, Guan-zhang Huang, Ching-ling Fan, and Cheng-hsin Hsu. 2021. On the Performance Comparisons of Native and Clientless Real-Time Screen-Sharing Technologies. *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.* 17, 2, Article 54 (May 2021), 26 pages. Available: <https://doi.org/10.1145/3437881>
- [14] Florian Bergsma, Benjamin Dowling, Florian Kohlar, Jörg Schwenk, and Douglas Stebila. 2014. Multi-Ciphersuite Security of the Secure Shell (SSH) Protocol. In *Proceedings of the 2014 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '14)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 369–381. Available: <https://doi.org/10.1145/2660267.2660286>
- [15] J. Dieguez Castro, “Debian,” in *Introducing Linux Distros*, 2016, Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-1392-6_6
- [16] Villegas Pablo, Muñoz Miguel A. and Bonachela Juan A. 2020, Evolution in the Debian GNU/Linux software network: analogies and differences with gene regulatory networks J. R. Soc.

- Interface.172019084520190845, Available:
<http://doi.org/10.1098/rsif.2019.0845>
- [17] Matteo Varvello, Kleomenis Katevas, Mihai Plesa, Hamed Haddadi, and Benjamin Livshits. 2019. BatteryLab, A Distributed Power Monitoring Platform For Mobile Devices. In Proceedings of the 18th ACM Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 101–108. Available:
<https://doi.org/10.1145/3365609.3365852>
- [18] Aguirre Hernández, E., Calva Bautista, J., Guerrero Zenil, A. E., Hernández Medellín, A. A., Hernández Hernández, S., & Hernández Hernández, G. (2017). Comparación de los modelos OSI y TCP/IP. Ciencia Huasteca Boletín Científico De La Escuela Superior De Huejutla, 5(10). Available:
<https://doi.org/10.29057/esh.v5i10.2461>
- [19] J. Bullock and J. T. Parker, “Introducing Wireshark Wireshark® for Security Professionals: Using Wireshark and the Metasploit® Framework,” 2017, Available:
<https://doi.org/10.1002/9781119183457.ch1>
- [20] R. Mittal et al., “TIMELY: RTT-based Congestion Control for the Datacenter,” Computer Communication Review, vol. 45, no. 4, pp. 537–550, Aug. 2015, Available:
<https://doi.org/10.1145/2785956.2787510>
- [21] K. Usman Majikumna, “Evaluating average throughput for quantity of data stream in an ndn rendezvous server,” 2021. [Online]. Available:
<https://www.researchgate.net/publication/342571499>
- [22] C. Ramos-Galarza, “Diseños de investigación experimental,” CienciAmérica, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, Feb. 2021, Available:
<https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>
- [23] P. K. D. Pramanik et al., "Power Consumption Analysis, Measurement, Management, and Issues: A State-of-the-Art Review of Smartphone Battery and Energy Usage," in IEEE Access, vol. 7, pp. 182113-182172, 2019, Available:
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958>

Exhibits

Figure 6
PuTTY Menu.

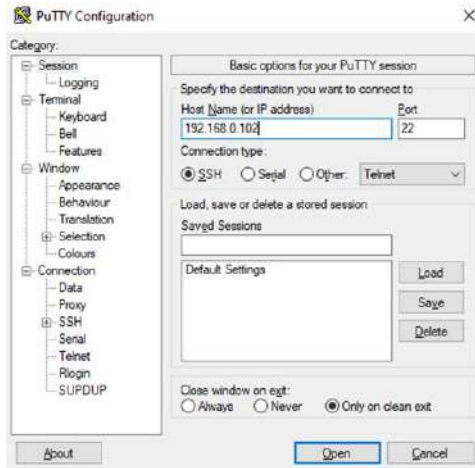


Figure 7
VNC Viewer interface.

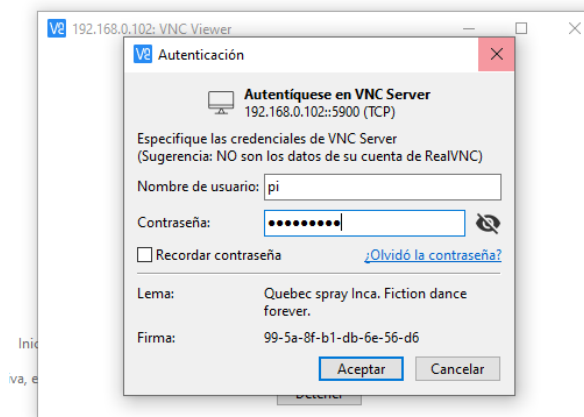


Figure 8
PiKISS installed.

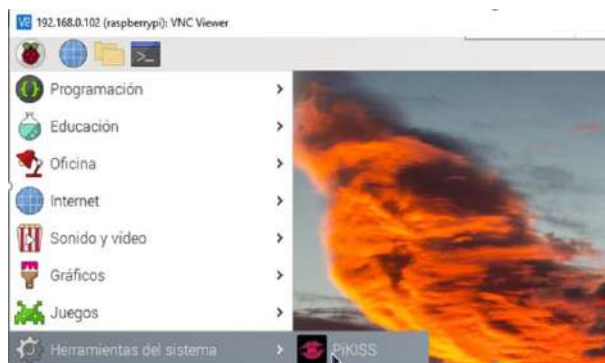


Figure 9
PiKISS options.

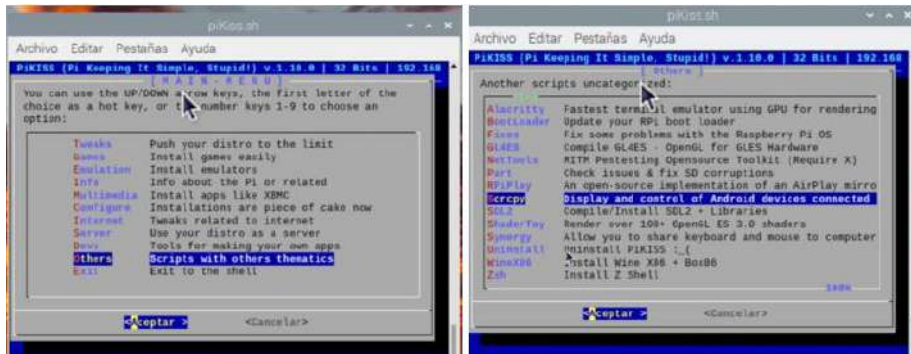
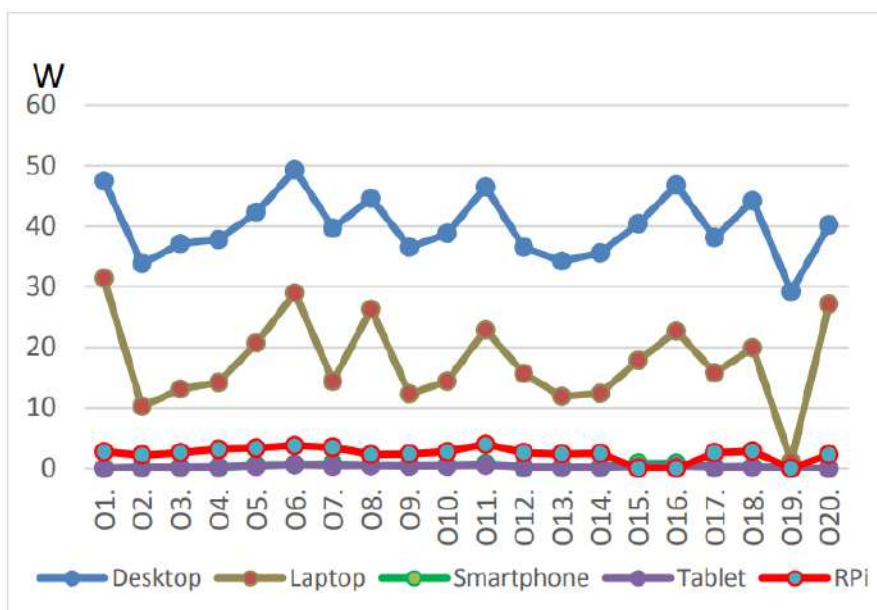


Figure 10
Wireless connection working.



Figure 11
Comparative chart of average power consumption among various devices





REVISTA INGENIO

Uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para la Predicción de la Resistencia a la Compresión y Módulo de Elasticidad del Hormigón

Use of Artificial Neural Networks (ANNs) for the Prediction of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Concrete.

Enlil Santiago Ganchala Padilla [1](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador

Jonathan Mauricio Piñarcaja Rivadeneira [2](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador

Luis Alejandro Machado Salazar [3](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 18/09/2023

Recepción tras revisión: 18/10/2023

Aprobación: 18/11/2023

Publicación: 15/01/2024

PALABRAS CLAVE

Redes neuronales artificiales (RNA), Neural Fitting (nftool), Diseño de mezclas, Resistencia a la Compresión (f_c), Módulo de elasticidad (Ec).

ARTICLE HISTORY

Received: 18/09/2023

Received after revision: 18/10/2023

Approved: 18/11/2023

Accepted: 15/1/2024

KEYWORDS

Artificial Neural Networks (RNA), Neural Fitting (nftool), Blend Design, Compression Resistance (f_c), Modulus of Elasticity (Ec).

RESUMEN

La presente investigación indica el diseño de un modelo de inteligencia artificial en base a redes neuronales artificiales (RNA) que permita predecir la resistencia a la compresión " f_c " y módulo de elasticidad "Ec" del hormigón. La metodología se realizó en tres etapas: La Etapa Delta donde se conformó una base de datos constituida por resultados de diseños de hormigones (caracterización de agregados, dosificaciones, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad) elaborados con cemento tipo GU sin aditivos y agregados procedentes de las canteras del Distrito Metropolitano de Quito, obtenidos de trabajos de titulación de diversas universidades del país y de ensayos comerciales realizados por el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. En la siguiente Etapa Theta se realizó el diseño de la RNA utilizando el software Matlab y la herramienta Neural Fitting "nftool" para el entrenamiento, validación y testeo de la RNA a través de indicadores de desempeño como el coeficiente de correlación de Pearson "R" en la etapa de evaluación y el coeficiente de determinación " R^2 " para medir la eficiencia de la RNA; finalmente en la etapa Gamma se comprobó los resultados pronosticados de la RNA con el " f_c " y "Ec" real del hormigón obtenidos a través de ensayos realizados a 20 cilindros de hormigón, diseñados para resistencias de 21, 24 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera de Pifo y cemento Tipo GU. Estableciendo que la RNA predice satisfactoriamente la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón obteniendo un valor de R^2 para el " f_c " igual a 95.12% y para el "Ec" de 92.20% entre los resultados pronosticados con los resultados reales para mezclas de 21, 24 y 28 MPa; validando su uso para la predicción de estas propiedades en el hormigón.

ABSTRACT

This research work outlines the development of an artificial intelligence model based on Artificial Neural Networks (ANNs) designed to forecast the Compressive Strength " f_c " and Elastic Modulus "Ec" of concrete. The research methodology was carried out in three stages: The Delta Stage where a comprehensive database was created, comprising data from various concrete mix designs. This database included aggregate characterization, mix proportions, compressive strength, and elastic modulus. These concrete mixes were produced using GU-type cement without additives and aggregates sourced from quarries in the Metropolitan District of Quito. Data were gathered from research projects conducted at different universities across the country and from commercial tests performed at the Materials Testing and Models Laboratory of the Faculty of Engineering and Applied Sciences. The Theta Stage involved the development of the ANN using MATLAB software and the Neural Fitting "nftool" tool for training, validation, and testing. Key performance indicators, such as the Pearson correlation coefficient "R", were employed during the evaluation stage, while the coefficient of determination " R^2 " was used to gauge the ANN's efficiency. Finally, in the Gamma Stage, the ANN's predicted results were compared with the actual concrete Compressive Strength " f_c " and Elastic Modulus "Ec" values, which were obtained through tests on 20 concrete cylinders designed for strengths of 21, 24, and 28 MPa. These cylinders were produced using aggregates from the Pifo quarry and GU-type cement. The results demonstrated that the ANN successfully predicted both compressive strength and elastic modulus, achieving an R^2 value of 95.12% for " f_c " and 92.20% for "Ec" in the case of mixtures with strengths of 21, 24, and 28 MPa. This validates the ANN's applicability for predicting these concrete properties.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material más usado por la industria de la construcción en el Ecuador, debido a sus propiedades de durabilidad y resistencia a lo largo del tiempo, y en conjunto con el acero de refuerzo ha logrado componer el 91.8% de las estructuras que se construyen en el país [1]. Su fabricación se realiza a partir de la mezcla de componentes como el agua, cemento, agregado fino y grueso; donde las proporciones de cada componente se ven afectadas directamente por el método de dosificación a utilizarse, influyendo principalmente en la resistencia a la compresión y otras propiedades mecánicas del hormigón como el módulo de elasticidad [2].

Es así como la resistencia a la compresión del hormigón evoluciona con el tiempo, y con su valor se realizan los diseños estructurales de obras civiles; mismo que se obtiene al realizar el ensayo estandarizado que se determina después de un periodo de curado en probetas cilíndricas, y se la mide cuando ha alcanzado una edad de 28 días después de realizada la mezcla [3].

Mientras que el módulo de elasticidad del hormigón, representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo, y desde el punto de vista de diseño y análisis de estructuras de hormigón armado, esta propiedad y su correcta estimación nos permite alcanzar análisis estructurales más acertados en cuanto a estudios de rigidez lateral de piso y el cálculo de derivas de piso en una estructura; cuyo valor se determina la mayoría de veces a través de ecuaciones impuestas por el American Concrete Institute (ACI) [4].

Por tal razón se han realizado estudios enfocados en conocer las propiedades del hormigón, utilizando agregados provenientes de ciertos lugares de nuestro país, y estableciendo experimentalmente ecuaciones "Ecuación 1" para obtener el módulo de elasticidad, con la finalidad de tener un valor confiable y más apegado a la realidad para el dimensionamiento de estructuras de hormigón armado; puesto que las ecuaciones propuestas por el comité ACI.318.19 (NEC-15) son ajustadas a las regiones de Estados Unidos, en las cuales tanto la calidad como características de los agregados y materiales son muy diferentes a los del país [5].

Ecuación 1

Fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad

$$E_{NEC} = 4700 * \sqrt{f'c} (MPa)$$

Por otro lado, la incorporación de Inteligencia Artificial (IA) en la investigación para predecir eventos de cualquier índole siempre ha despertado interés en los seres humanos, es así como la aplicación de Redes Neuronales Artificiales permite adaptar paradigmas naturales y aplicarlos para la solución práctica de problemas. En Ingeniería, pueden ser adaptadas en modelos con información histórica y ser procesados por un computador para predecir el comportamiento o resultado sin tener la necesidad de descubrir estrechas

relaciones matemáticas entre variables que resultan complejas para el ser humano [6].

Es por esto que Villegas [7] afirma que las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son un modelo de cómputo que, por su estructura, trata de imitar el comportamiento del cerebro de forma similar al de las neuronas biológicas, a través del procesamiento de datos de entrada mediante algoritmos matemáticos que generen un resultado que obedezca al aprendizaje de dicho proceso; obteniendo una red que identifica características y resultados a valores de respuesta de acuerdo al historial de datos que se registran. A nivel nacional se han realizado pocas investigaciones utilizando RNA aplicados al campo de ingeniería civil, como es la investigación de López & Ontaneda [8] titulada "Diseño de mezclas de hormigón aplicando redes neuronales artificiales para diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha", desarrollaron una herramienta para estimar cantidades de los componentes de hormigón para diversas resistencias a través de las RNA utilizando el software Matlab y Java, para lo cual realizaron una base de datos compuesto por los diseños de hormigón convencionales con cemento tipo GU y sin aditivos, demostrando que el uso de RNA es una alternativa viable para el diseño de mezclas de hormigón, pues estimaron dosificaciones con un coeficiente de determinación del 96.57% para hormigones de resistencias entre 21 y 28 MPa.

La presente investigación tiene objetivo proponer un modelo matemático mediante el uso de redes neuronales artificiales que permita la predicción de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón, pues en el laboratorio de ensayos de materiales y modelos de la Universidad Central del Ecuador y demás universidades existe gran cantidad de estudios relacionados a la obtención de las propiedades $f'c$ y E_c , mismos que han utilizado agregados de distintas canteras y cemento portland tipo GU, cuyos resultados se encuentran almacenados y sin uso. Conformando una base de datos histórica de diseños de mezclas de hormigón que se utilizaron en el desarrollo de la estructura de la RNA más apropiada para la predicción de las propiedades $f'c$ y E_c , cuyos modelos se evaluaron a través de los coeficientes de correlación Pearson "R" el cual indica la relación existente entre las variables de entrada y salida. Y finalmente se comprueba los valores pronosticados y eficiencia del modelo con ensayos de resistencias a la compresión y módulo de elasticidad de probetas cilíndricas de hormigón cuyo indicador de validaciones el coeficiente de determinación R^2 que nos indica la relación entre los valores experimentales y pronosticados del modelo.

Siendo este modelo matemático un aporte para aquellos diseñadores que utilizan fórmulas empíricas para estimar el módulo de elasticidad y aplicarlo en diseños estructurales de proyectos de hormigón armado, pues los resultados que

obtendrán serán a partir de datos reales en función de las características de los materiales que se pretende utilizar, y así obtener un comportamiento adecuado y lo más cercano a la realidad en sus modelos estructurales.

Dentro del presente proyecto de investigación uno de los aspectos más importantes y limitaciones considerados en la creación de la herramienta Informática, es el lugar de procedencia de los materiales que conforman el hormigón; puesto que el espectro de datos que se utilizó considera únicamente a ensayos de hormigones con agregados pertenecientes al distrito metropolitano de Quito cuya dosificación sea prevista para 21, 24 y 28 MPa, exenta de aditivos o cualquier otro material en su composición y únicamente que hayan utilizado cementos portland tipo GU.

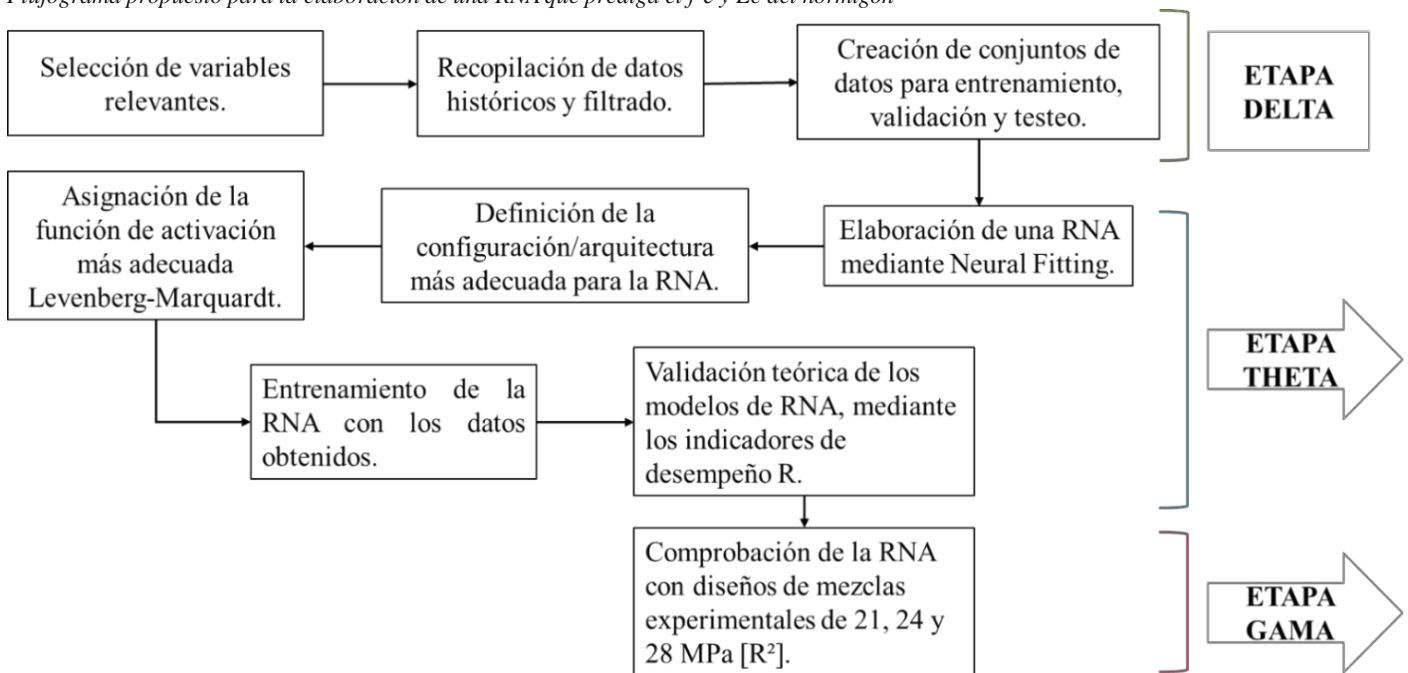
2. MÉTODO

Se detalla el proceso por el cual se llevó a cabo el desarrollo de la Red Neuronal Artificial más adecuada que permita la predicción de valores como la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón a la edad de 28 días con el menor error posible al momento de validarla a través de ensayos normalizados de probetas cilíndricas.

La elaboración de la RNA consiste en una serie de procesos a seguir, mismos que se explican a lo largo de esta sección y que se utilizan de manera general para la predicción de variables a través de RNA presentado gráficamente en la Figura. 1

Figura. 1

Flujograma propuesto para la elaboración de una RNA que prediga el $f'c$ y Ec del hormigón



Nota: En la imagen se indica el procedimiento realizado para la elaboración de esta investigación.

2.1 Etapa Delta

Se realiza la selección de las variables influyentes en las propiedades del hormigón como es la $f'c$ y Ec , tomando en cuenta los estudios de López & Ontaneda [8] y Santamaria, Morales & Pilaluisa [9] los cuales indican el análisis de sensibilidad de variables y los parámetros que tienen mayor incidencia en la determinación de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón. Teniendo así los parámetros más relevantes

con lo que se conformó y depuró el espectro de datos en el software Microsoft Excel, y cuyos valores fueron tomados de diferentes ensayos comerciales e investigaciones cuyo objetivo ha sido la obtención del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del hormigón para diferentes dosificaciones utilizando agregados de las principales canteras del distrito metropolitano de Quito, observando en la Tabla. 1 las referencias y procedencia de la información tomada para esta investigación son cuanto a la elaboración de la base de datos.

Tabla. 1

Referencias de datos utilizados en la investigación

N°	UNIVERSIDAD	TITULO	AUTOR
1	Escuela Politécnica del Ejército	Módulos de elasticidad y curvas de esfuerzo deformación. en base a la compresión del hormigón a 21. 28. 35 MPa	Sofía Elizabeth Herrería Cisneros. Fausto Marcelo Villegas Dávila
2	Universidad Católica del Ecuador	Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad representativo para la provincia de pichincha. en muestras de cilindros de hormigón con materiales de la mina de san Antonio de pichincha.	Israel Jiménez. Alexis valladares
3	Universidad Católica del Ecuador	Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón en la provincia de pichincha elaborado con materiales de la mina Holcim, ubicada en la parroquia pifo y cemento Holcim	Londoño Doménica. Terán Wilson
4	Universidad Central del Ecuador	Módulo estático de elasticidad del hormigón. en base a su resistencia a la compresión: $f'_c = 21$ y 28 MPa. fabricado con materiales de la mina de Guayllabamba-pichincha y cemento Selvalegre	Morales Escobar Diego Alejandro. Ojeda Cueva Franklin Santiago. Rodríguez Narváez Diego David. Rosero Benavides Arturo Javier Asmal Iturralde Daniel. Andrés.
5	Universidad Central del Ecuador	Estudio del módulo de elasticidad estático del hormigón en base a la resistencia a la compresión ($f'_c = 21, 28$ MPa) fabricado con material de la mina de Pintag.	Ocaña Borja Jorge. Luis Perdomo Velásquez Alejandro. Antonio Pérez Casco Juan Carlos
6	Universidad Central del Ecuador	Caracterización del módulo estático de elasticidad del hormigón a partir de pruebas a compresión simple en probetas cilíndricas con diferentes agregados del cantón quito, provincia de pichincha	Paucar Paucar Mayra Alexandra. Sacasari Luzpa Grace Stephanie
7	universidad Central del Ecuador	Determinación del módulo de rotura y deflexiones en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de las canteras de pifo, San Antonio de pichincha y Guayllabamba	Morales Sandoval Edison Fernando. Morocho Jumbo José Antonio. Porras Abril Erick Alexander. Sánchez Reinoso Nelson Aníbal
8	Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos	Ensayos comerciales	Universidad Central

2.1.1 Identificación de variables para la elaboración de la base de datos en el diseño de la RNA.

Para la elaboración de la base de datos se ocuparon resultados e información de ensayos comerciales e investigaciones realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Modelos de la Universidad Central del Ecuador, así como también información de proyectos de investigación realizados en las diferentes Universidades del país relacionados al objeto de estudio.

La información obtenida presentada en la Tabla. 2, corresponden a la caracterización de los agregados, tipo de cemento, dosificación, propiedades del hormigón en estado fresco como el asentamiento y hormigón en estado endurecido como resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

Tabla. 2*Parámetros obtenidos de diseño de mezclas*

INDICADOR DE MEDICIÓN	SIMBOLOGÍA	UNIDAD
Cantidad de Cemento	C	
Cantidad de Agua.	W	
Cantidad de Agregado Arena	A	Kilogramos (Kg)
Cantidad de Agregado Grueso	R	
Módulo de finura arena	MFA	
Módulo de finura ripio	MFR	Adimensional
Tamaño nominal máximo ripio	TNM	Milímetros (mm)
Densidad suelta arena (DSA)	DSA	
Densidad suelta ripio (DSR)	DSR	
Densidad compactada arena (DCA)	DCA	Gramos por centímetro cúbico (g/cm ³)
Densidad compactada ripio (DCR)	DCR	
Densidad aparente arena (DAR)	DAA	
Densidad aparente ripio (DAR)	DAR	
Capacidad de absorción arena (CAA)	CAA	
Capacidad de absorción ripio (CAR)	CAR	Porcentaje (%)
Abrasión (AB)	AB	
Resistencia a la compresión f'c (28 días)	f'c	MPa
Módulo de elasticidad (28 días)	Ec	MPa

Nota. La tabla muestra los parámetros obtenidos de la recopilación de información de ensayos comerciales y proyectos de investigación relacionados a la resistencia a la compresión y módulos de elasticidad del hormigón.

Una vez realizada la recopilación de información se obtuvo el siguiente resumen del espectro de datos que se indica en la Tabla 3.

Tabla. 3*Numero de datos obtenido en la recopilación*

F'c (MPa)	Nº Datos
21	186
24	103
28	112
35	24
Total	425

Nota. En la tabla se indica el número total de datos obtenidos y recopilados de acuerdo con cada resistencia.

Con la información recopilada se realiza la depuración o filtrado del espectro de datos a través de la identificación de datos atípicos y uso de rangos aceptables a través de:

Criterio del rango máximo: La primera clasificación se realizó con la recomendación de la norma ASTM-C31 cuya adaptación a la normativa ecuatoriana es NTE-INEN-1573 [10], que nos indica los rangos de variación aceptables de acuerdo con la Figura. 2.

Figura. 2*Rango de variación de resistencia de cilindros individuales*

	Coeficiente de variación (ver nota 12)	Rango aceptable de variación de resistencia de cilindros individuales (ver nota 12)	
		2 cilindros	3 cilindros
Cilindros de 150 por 300 mm			
Condiciones de laboratorio	2,4%	6,6%	7,8%
Condiciones de campo	2,9%	8,0%	9,5%
Cilindros de 100 por 200 mm			
Condiciones de laboratorio	3,2%	9,0%	10,6%

Nota: En la imagen se puede observar el coeficiente de variación para ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de hormigón. NTE INEN 1573 [10].

Método de Tukey: Conocido también como diagrama de caja y bigotes, [11] lo identifica como un gráfico que presenta la tendencia central, dispersión y la simetría de un conjunto de datos, además que permite identificar elementos atípicos de manera sencilla.

Finalmente, luego de realizar el proceso de depuración de datos se resume el espectro de datos a utilizarse para el f'c y Ec de la siguiente manera como se indica en la Tabla. 4.

Tabla. 4.

Datos a utilizarse luego del filtrado para $f'c$ y E_c .

F'c	Nº Datos
21	98
24	54
28	60
Total	212

Nota. La tabla muestra el número total de datos obtenidos para cada resistencia luego de realizar el proceso de filtrado a utilizarse en la RNA para la predicción de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.

2.1.2 Capa de entrada (INPUT)

Para definir las variables de la capa de entrada que se utilizaron en la programación de la Red Neuronal Artificial se tomó en cuenta los parámetros y análisis de sensibilidad detallados en el apartado 2.1., como es la caracterización de los agregados y dosificación, que son parámetros que influyen en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón, dándonos un total de 17 variables. Los parámetros a ocupar en la capa de entrada se presentan en la Tabla. 5.

Tabla. 5

Variables capa de entrada

N.º	Capa	Variable	Unidad
1		Resistencia a la compresión de diseño ($f'cd$)	MPa
2		Módulo de finura arena (MFA)	Adimensional
3		Módulo de finura ripio (MFR)	
4	ENTRADA	Tamaño nominal máximo ripio (TNM)	Milímetros (mm)
5		Densidad suelta arena (DSA)	Gramos por centímetro cúbico (g/cm^3)
6		Densidad suelta ripio (DSR)	
7		Densidad compactada arena (DCA)	
8		Densidad compactada ripio (DCR)	Porcentaje (%)
9		Densidad aparente arena (DAR)	
10		Densidad aparente ripio (DAR)	Kilogramo (kg)
11		Capacidad de absorción arena (CAA)	
12		Capacidad de absorción ripio (CAR)	
13		Cantidad de Cemento (C)	
14		Cantidad de Agua (W)	
15		Cantidad de Agregado Arena (A)	
16		Cantidad de Agregado Grueso (R)	
17		Tipo de cemento	Adimensional

Nota. La tabla muestra las variables de entrada que se ocuparán para realizar la programación de la RNA.

2.1.3 Capa de salida (OUTPUT)

De acuerdo al objeto de estudio se definió las 2 variables de la capa de salida que se presentan en la Tabla. 6 correspondientes a las propiedades del hormigón en estado endurecido como son la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón a la edad de 28 días. (Anexo Tabla 6)

2.2 Etapa Theta

Se presenta lo realizado en cuanto a la programación y creación de la Red Neuronal Artificial en el software Matlab y su herramienta Neural Fitting "nftool", en la que se implementó las variables de entrada y salida, estructura, tipo, funciones de activación, entrenamiento, simulación y prueba con un correcto desempeño para diferentes RNA, verificando el coeficiente de Correlación "R" que indica el error en los resultados.

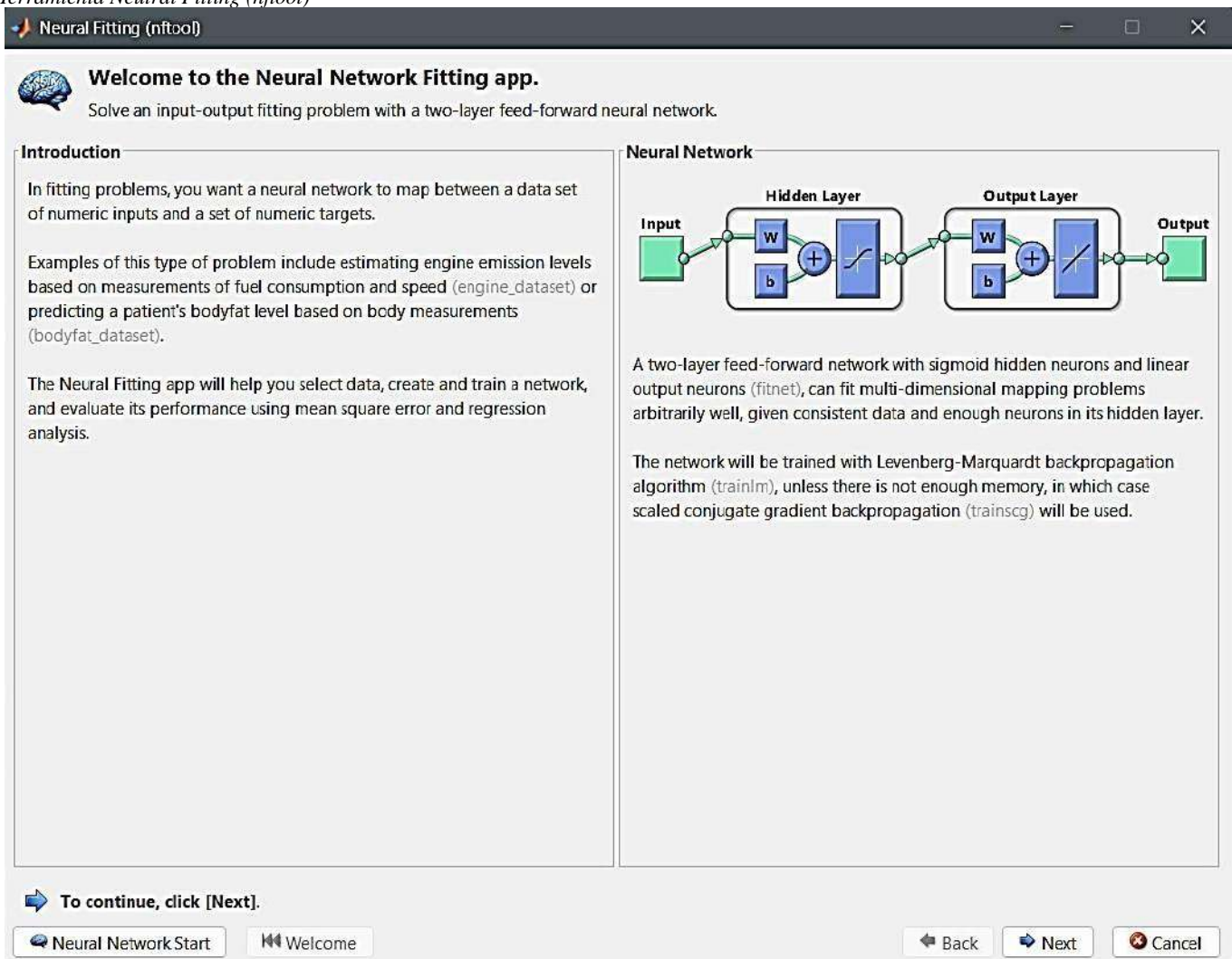
2.3 Construcción, entrenamiento y validación de la RNA

Se realizó la construcción de la red neuronal artificial (RNA) a través de MATLAB, con la herramienta Neural Fitting "nftool" de toolbox como se indica en la Figura. 3. Esta herramienta es una red neuronal multicapa estándar predeterminada que considera la interrelación de los parámetros y el error de estimación (Multilayer perceptron feed-forward backpropagation MLPFFB) de dos capas (entrada y salida) tipo feed-forward usada como función de aproximación para predicción de datos a partir de información real, con una capa oculta que utiliza la función sigmoideal de activación y una función lineal para la capa de salida teniendo los siguientes parámetros de la RNA:

Feed-forward: Implica que las conexiones van en sentido hacia adelante y es unidireccional.

- **Perceptrón Multicapa:** Posee en su arquitectura neuronas agrupadas en varios niveles o capas intermedias entre las neuronas de entrada y salida.
- **Backpropagation:** Es un tipo de aprendizaje por corrección de error supervisado, que es el recomendado para redes multicapa, ya que se proporciona una actualización de los pesos sinápticos usados por las neuronas para emitir un resultado en función de la diferencia de valores deseados (experimentales) y los obtenidos en la salida (pronosticados).

Figura. 3
Herramienta Neural Fitting (nftool)

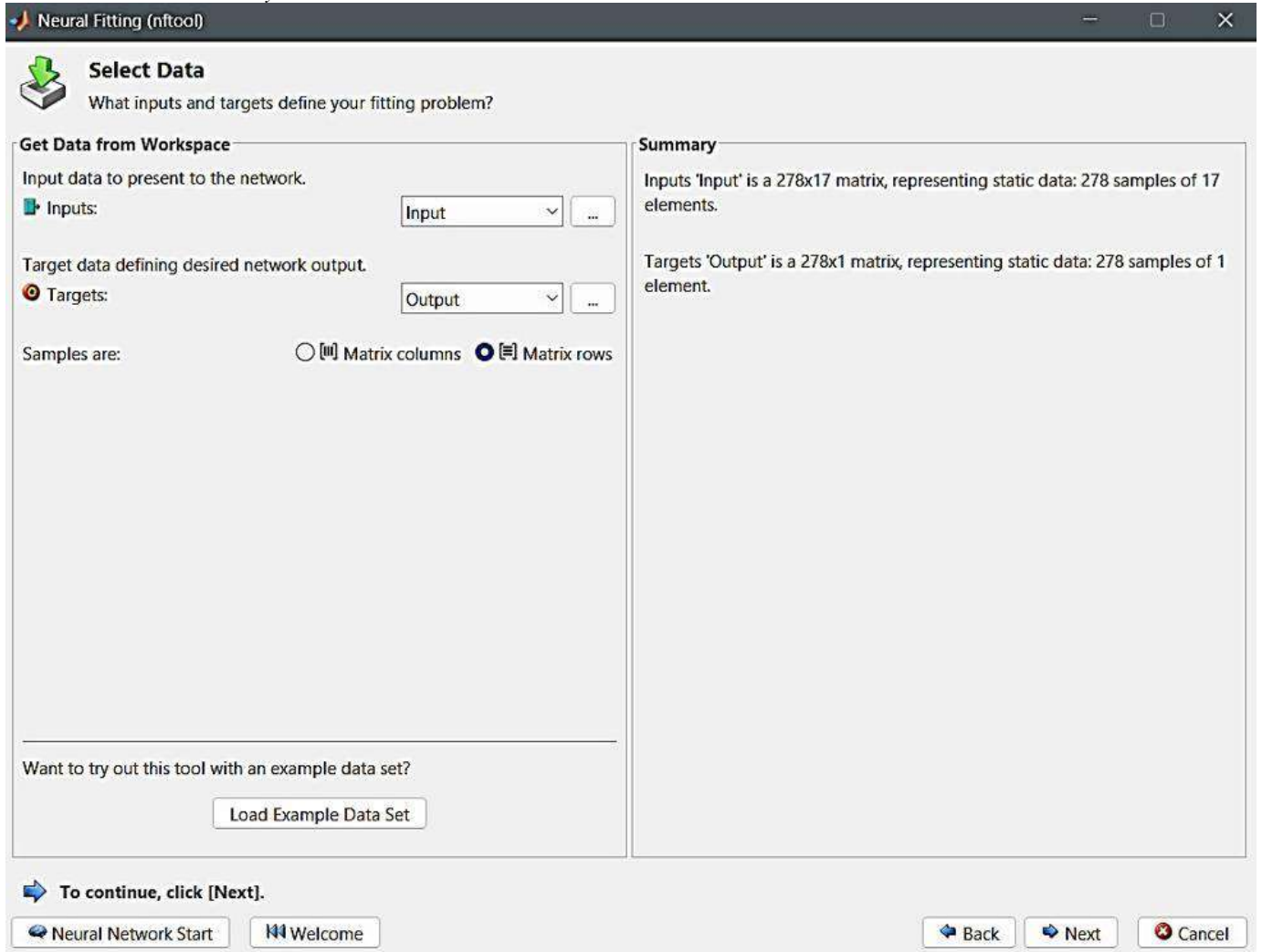


Nota: En la imagen se observa la arquitectura de la red neuronal y el tipo de red que se utilizara. Matlab [12].

Definida la arquitectura de la red neuronal a utilizarse, se obtiene la siguiente interfaz como se muestra en la Figura. 4, donde se selecciona la matriz de entrada o inputs y la matriz de salida o targets. Tomando en

consideración las variables como se describió en los apartados anteriores donde se determinó los parámetros de entrada establecidos en la Tabla. 5 y los parámetros de salida establecidos en la Tabla.

Figura. 4
Selección de datos de entrada y salida



Nota. Input Data. Se seleccionan los datos que se requieren como entrada para llevar a cabo el entrenamiento. Target Data: Se seleccionan los datos con los que se quiere llevar a cabo el entrenamiento. Matlab [12].

2.3.1 Entrenamiento Red Neuronal Artificial (RNA)

Siguiendo con la creación de la red neuronal se tiene la ventana de validación y test. Donde el porcentaje para el entrenamiento es del 70% del número total de datos ingresados (Inputs – Targets), el porcentaje elegido para

la validación es del 15% de la muestra y el 15% restante se utilizará para el testeo. Ayudándonos a medir la generalización de la red y parar el entrenamiento cuando la generalización deja de mejorar antes de que se genere el sobre entrenamiento, como se indica en la Figura. 5.

Figura. 5.
Porcentaje de validación y testeo de la red neuronal artificial



Nota: Se observa la interfaz y porcentajes elegidos para la validación y testeo de la Red neuronal. Matlab [12].

Posteriormente se tiene la arquitectura de la red neuronal artificial, donde se selecciona el número idóneo de capas ocultas y el número de neuronas. Por default, el número de neuronas en la capa oculta es de 10 el cual puede ser modificado para mejorar el desempeño en la predicción de la red.

Los elementos que conforman la red neuronal para el caso de estudio son 17 capas de entrada como variables predictoras procesadas con una capa oculta de 10 neuronas propuestas para experimentación y 1 capa de salida correspondiente al valor estimado de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón según sea el caso, como se puede visualizar en la Figura. 6. (Anexo Fig.6)

Una vez definida la arquitectura de la red neuronal se procede a seleccionar el algoritmo de entrenamiento dentro la herramienta Neural Fitting (nftool) donde se tiene las siguientes opciones; Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization y Scaled Conjugate Gradient. Donde se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquardt backpropagation (Trainlm).

Tomando en cuenta; según Arias [13], este algoritmo es el proceso por el cual se basa una RNA con aprendizaje backpropagation que consiste en la obtención de

resultados a través del ajuste de curvas con el método de mínimos cuadrados no lineales, de manera que el software utiliza este principio para obtener la solución más adecuada a través de este método iterativo, teniendo las siguientes ventajas:

- Posee una mejor confiabilidad y desempeño en cuando al tiempo de entrenamiento y predicción de los resultados
- Este modelo permite manejar múltiples parámetros libres que no se conoce con precisión su relación
- A pesar de que ocupa más memoria del ordenador, es la que emite resultados en menor tiempo

Además, dentro de los parámetros de la red se tiene la Función de transferencia en la capa oculta Hyperbolic tangent sigmoid (tansig) y en la Función de transferencia para la capa de salida Función lineal (purelin):

- **Tansig:** Se utiliza debido a que los pesos sinápticos pueden obtener valores positivos y negativos, de manera que se puede con esta implementar la incidencia de las variables con respecto a las capas ocultas.

- **Purelin:** Se utiliza luego de que pase la capa oculta para que a medida que se disminuya la participación entre estas neuronas, se mantenga la sensibilidad lineal pues todas estas propiedades son de importancia para el modelo.

El desempeño en la predicción de la red neuronal artificial se realizó utilizando los parámetros de coeficiente de correlación R_{yel} promedio de los errores al cuadrado MSE. Lo expuesto anteriormente dentro de Matlab y su codificación se puede identificar en la Figura 7. (Anexo Fig.7)

2.3.2 Validación Red Neuronal Artificial (RNA)

Para la validación de la red neuronal artificial y verificación de la exactitud del modelo de predicción de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón se utilizará los indicadores de desempeño generados en la herramienta Neural Fitting (nftool) denominado Error Cuadrático Medio (MSE) y el coeficiente de correlación de Pearson R.

- **El coeficiente R** mide la correlación entre los datos obtenidos por el modelo (Outputs) y los datos reales (Targets) donde un valor de $R=1$ representa una predicción exacta donde los resultados obtenidos del modelo Outputs son iguales a los datos reales Targets, caso contrario valores de R cercanos a 0 nos indica que el modelo no es adecuado para la predicción requerida.

- **Error Cuadrático Medio (MSE)** donde el error es la diferencia en los datos obtenidos del modelo outputs y los datos reales targets. Bajos valores en el MSE indican que el modelo tiene una aproximación adecuada

Una vez entrenada la red neuronal aparecerá la siguiente interfaz de entrenamiento como se muestra en la Figura 8. (Anexo Fig.8)

Gracias a la ventana de entrenamiento se observa los resultados y graficas que se describen a continuación:

- **Performance:** Muestra el error cuadrático medio (MSE) en función del número de iteraciones como se muestra en la Figura. 9 (Anexo Fig.9) donde si el valor del MSE es cercano a 0 nos indica un correcto modelo de red neuronal.

- **Regression:** En la Figura. 10 (Anexo Fig.10) se puede observar la recta de regresión lineal para cada conjunto de entrenamiento, validación, testeo y otro para el conjunto de datos total. Si el valor de R se aproxima a uno, la correlación tendrá mayor dependencia entre salida y la salida deseada.

Como se pudo observar la RNA presenta un coeficiente de Pearson igual a 0.94967 que garantiza la validez del modelo ya que estadísticamente se aproxima a 1, esto posteriormente se comparará con los resultados.

2.4 Etapa Gamma

Se validó la RNA más adecuada cuya distribución de resultados implicó el menor % error o coeficiente R y R^2 para la predicción de las propiedades en cuestión, a través del diseño de hormigón para 21, 24 y 28 MPa, con agregados del cantera de Holcim-Pifo y cemento Holcim tipo GU; de modo que se obtuvieron sus propiedades de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad real, comparándolos con los valores pronosticados por la red neuronal artificial, evidenciando la eficiencia del modelo. La selección y motivo de utilizar estos agregados de la cantera antes mencionada, se debe a que son materiales comúnmente utilizados en la construcción dentro del distrito Metropolitano de Quito y también a que la RNA está elaborada con una base de datos con las propiedades de los agregados de las anteras ubicadas dentro del mismo distrito.

Y el motivo de emplear este tipo de cemento se debe a que es utilizado en diferentes tipos de obra de construcción, además de que la base de datos de la RNA está elaborada únicamente con el tipo de cemento GU.

2.4.1 Ensayos de los agregados

Los ensayos que se realizan en los agregados fino y grueso son de suma importancia ya que permite experimentales de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón realizado en el laboratorio de Ensayos de Materiales de la Universidad Central del Ecuador.

Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, y con los resultados obtenidos realizar el diseño de mezclas de hormigón, que sirven para la elaboración de probetas cilíndricas que luego de ser ensayadas se utilizan para la validación de la RNA con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados.

Los ensayos se realizan de acuerdo con la normativa NTE INEN y ASTM; donde se efectuarán únicamente aquellos cuyos resultados tengan mayor incidencia en la determinación de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón los cuales se definieron en la etapa Delta.

Realizando los siguientes ensayos de acuerdo a la normativa vigente:

- Ensayo de Granulometría - (NTE INEN 696).
- Ensayo de Abrasión - (NTE INEN 860).
- Densidad aparente suelta y compactada - (NTE INEN 858).

- Densidad Real (SSS) - (NTE INEN 856) y (NTE INEN 857).
- Capacidad de Absorción - (NTE INEN 856) y (NTE INEN 857).
- Contenido de humedad - (INEN 862).

Se presenta en la Tabla. 7 el resumen de las propiedades de los ensayos realizados en los agregados fino, grueso y cemento procedentes de la cantera Holcim – Pifo. (Anexo Tabla 7).

2.4.2 Diseño de mezclas

Se realiza el diseño de mezclas mediante el método de densidad máxima ya que en el medio existen agregados gruesos y finos que no cumplen con los requisitos para ser utilizados en el diseño de hormigones por el A.C.I., en los que su granulometría, no están dentro de los límites especificados por la curva granulométrica [14]. La principal característica del método de Densidad Máxima es el de utilizar la mínima cantidad de pasta para obtener un hormigón de buena calidad, para lo cual se debe realizar una correcta combinación de agregados que deje el menor porcentaje de vacíos posibles. Para obtener una correcta combinación de los agregados se lo realiza mediante un ensayo de Densidad Óptima de los Agregados.

La elaboración del hormigón en esta investigación se la realiza bajo la norma NTE INEN 1855-2 [15] y la toma de muestras bajo la norma NTE INEN 1763 [16], Para lo cual se elaboró 10 probetas cilíndricas de 150x300mm para determinar el módulo de elasticidad y 10 probetas de 100x200mm para determinar la resistencia a la compresión; esto por cada resistencia especificada de 21, 24 y 28 MPa dándonos un total de 60 probetas, las cuales se ensayaron a la edad de 28 días para obtener el $f'c$ y E_c experimental o real con la finalidad de comparar con los $f'c$ y E_c pronosticados por la red neuronal artificial.

2.4.3 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón

La obtención experimental del módulo de elasticidad del hormigón se lo realiza en base a la norma A.S.T.M. C. 469-94 “Método Estándar de Ensayo para determinar el módulo estático de elasticidad y relación de Poisson del hormigón en compresión” y para la obtención de la resistencia a la compresión del hormigón se realiza bajo la norma NTE INEN 1573 [10] - ASTM C-39.

Debido a la composición heterogénea de los materiales que conforman el hormigón, esta presenta una variación de resultados en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón, es decir las muestras tomadas de una misma mezcla difícilmente se obtendrán resultados iguales.

Por tal motivo para obtener un valor representativo de los ensayos realizados a las probetas, generalmente se determina mediante la media aritmética; resistencia a la compresión media (f'_{cm}) y módulo de elasticidad medio (E_{cm}) de los n valores de rotura la cual no toma en cuenta la dispersión de los valores de resistencia y módulo obtenidos, y esto no refleja la verdadera calidad del hormigón a ser estudiado. Por tal razón se adoptó el concepto de resistencia y módulo de elasticidad característico del hormigón, que es una medida estadística que toma en cuenta el valor de la media aritmética (f'_{cm} y E_{cm}) de las roturas de las diversas probetas y también la desviación estándar de la serie de valores como se puede observar en la Tabla. 8. (Anexo Tabla 8).

3. RESULTADO Y DISCUSIÓN

Se realizó varios modelos de redes neuronales artificiales para cada caso de estudio con la finalidad de obtener diferentes arquitecturas y escoger un modelo que nos genere los mejores resultados en cuanto a la predicción de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón.

A continuación, se indica la arquitectura de los 5 modelos de redes neuronales artificiales diseñados cuya aproximación fue la más satisfactoria en los resultados pronosticados; así también se muestra el número de neuronas en la capa de entrada, en la capa oculta, capa de salida, las funciones de activación que se han seleccionado y los coeficientes de regresión R de cada uno de los subconjuntos que la red neuronal crea por defecto para su correcto desempeño.

3.1 Resultados de modelos de RNA para Resistencia a la compresión $f'c$

De la Tabla. 9 se puede identificar que el coeficiente de determinación R^2 en las 5 RNA elaboradas, tienen un valor cercano a 1 indicando que existe una gran relación entre los valores pronosticados y los obtenidos experimentalmente, indicando que las RNA nos permite tener una gran precisión en la predicción de la resistencia a la compresión. Sin embargo, realizando un análisis detallado se establece que la red RNA_3 genera mejores resultados, seleccionándola como el modelo final de predicción para la resistencia a la compresión " $f'c$ " de la presente investigación. Además, se puede identificar que no necesariamente al tener el coeficiente de Pearson R más cercano a 1, nos emite mejores resultados la RNA. Anexo Tabla 9.

La Figura. 11 (Anexo Fig.11) indica en sus gráficas las correlaciones lineales y su tendencia en cada uno de los procesos de la RNA, indicando el coeficiente de Pearson tanto para el entrenamiento, validación y testeado de la red; los cuales se generalizan con un valor de 0.96617, confirmando que la dispersión de datos posee una relación lineal alta, siendo este un indicador que la red se desempeña de manera correcta.

La RNA_3 posee en su arquitectura 20 capas, mismas que toman para el entrenamiento un porcentaje del 70% de los datos filtrados, 15% de ellos para la validación y el 15% restante para el testeo utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt backpropagation.

3.2 Resultados de modelos de RNA para Módulo de elasticidad Ec

La Tabla. 10 muestra los diferentes tipos de arquitectura de los 5 modelos de redes neuronales diseñados y los resultados obtenidos de cada una. (Anexo Tabla 10).

La red neuronal cuyo coeficiente de determinación R^2 tiene el valor más cercano a 1, es la RNA_E5 con un valor de 0.9220 que garantiza la validez del modelo escogido; por lo tanto, este modelo será utilizado para predecir el módulo de elasticidad del hormigón de los tres diseños de mezclas elaboradas para la etapa de comprobación de la RNA.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la RNA_5 en la Figura. 12 (Anexo Fig.12).

La Figura. 12 indica las correlaciones lineales entre los módulos de elasticidad del hormigón obtenidas de la red neuronal artificial mediante los tres subconjuntos (entrenamiento, validación y test) con los datos del conjunto TARGET respectivamente. El cuarto gráfico es una correlación lineal general de los resultados obtenidos del conjunto INPUT mediante la red neuronal y los datos del conjunto TARGET.

En el proceso de entrenamiento, se empleó el 70% de los datos y se puede observar una distribución próxima a la lineal con un coeficiente de correlación R igual 0.98047, en la validación se emplea el 15% de los registros disponibles, y se puede observar una distribución próxima a la lineal con un coeficiente de correlación R igual 0.96755. El 15% de los datos restantes se utilizan para el proceso de prueba o test; se puede observar que los datos se ajustan al modelo planteado con un coeficiente de correlación R igual 0.97429 lo cual indica que el modelo de red neuronal tiene un comportamiento aceptable.

También se observa el comportamiento general de la red neuronal, tomando todos los resultados obtenidos de los procesos de entrenamiento, validación y prueba, dado a conocer una correcta distribución por parte de los datos con un coeficiente de correlación R igual a 0.97726.

3.3 Comparación de $f'c$ mediante RNA y $f'c$ experimental

La Tabla. 11 muestra los resultados obtenidos de resistencia a la compresión pronosticados por la RNA y resistencia a la compresión experimental o real. (Anexo Tabla 11).

A continuación, se presenta el cálculo típico para determinar el porcentaje de error para la resistencia de 21 MPa, el cual es similar para las otras resistencias de 24 y 28 MPa.

$$\begin{aligned} \text{Error} (\%) &= \frac{F'c \text{ Experimental} - Fc \text{ Pronosticado}}{F'c \text{ Experimental}} \\ &\quad * 100 \\ \text{Error}(\%) &= \frac{24.50 - 21.25}{24.50} * 100 \\ \text{Error}(21\text{MPa}) &= 13.27\% \end{aligned}$$

Respecto a los porcentajes de error obtenidos, es importante señalar que estos deben ser lo más bajo posible, ya que cuanto menor sea el margen de error se tendrá mayor confiabilidad en los resultados, como es el caso de la predicción de la resistencia a la compresión donde se tiene un error promedio del 5.71% con un nivel de confiabilidad mayor al 94.29%.

A continuación, se presenta la Figura. 13 (Anexo Fig.13) donde se compara la Resistencia a la compresión experimental y la resistencia pronosticada por la RNA_3.

Se verifica que, con una correlación lineal entre la resistencia a la compresión obtenida en la RNA y la resistencia a la compresión experimental o real, en el eje de las abscisas se tiene la resistencia a la compresión experimental obtenida mediante la normativa A.S.T.M. C 39, y en el eje de las ordenadas la resistencia a la compresión pronosticada por la RNA. En la Figura. 14 se observa el comportamiento del modelo de red neuronal diseñada, donde se tiene un coeficiente de correlación R igual a 0.9512, lo que indica que la RNA realiza una predicción aceptable de la resistencia a la compresión de los diseños de mezclas de 21, 24 y 28 MPa ensayados con agregados de la cantera Holcim- Pifo y cemento Holcim tipo GU.

Con lo antes mencionado se puede concluir que el modelo es adecuado y confiable para realizar las predicciones de resistencia a la Compresión.

3.4 Comparación de E_c mediante RNA y E_c experimental

La Tabla. 12 (Anexo Fig.12) muestra los resultados obtenidos de módulo de elasticidad pronosticado por la RNA y módulo de elasticidad experimental o real. Anexo Tabla 12.

A continuación, se presenta el cálculo típico para determinar el porcentaje de error en la predicción del módulo de elasticidad de una resistencia de diseño de 21 MPa, el cual es similar para las otras resistencias de 24 y 28 MPa.

$$Error (\%) = \frac{F'c_{Experimental} - F'c_{Pronosticados}}{F'c_{Experimental}} * 100$$

$$Error(\%) = \frac{19887,98 - 20803}{19887,98} * 100$$

$$Error(21MPa) = 4.60\%$$

Respecto a los porcentajes de error obtenidos, es importante señalar que estos deben ser lo más bajo posible, ya que cuanto menor sea el margen de error se tendrá mayor confiabilidad en los resultados, como es el caso de la predicción de la resistencia a la compresión donde se tiene un error promedio del 4.60% con un nivel de confiabilidad mayor al 93.24%.

A continuación, se presenta la Figura. 15 donde se compara el módulo de elasticidad experimental como indica la norma ASTM 469 y el módulo de elasticidad pronosticado por la RNA_E5. De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir que estos cumplen las expectativas propuestas, obteniendo un porcentaje de error bajo para cada resistencia especificada de 21, 24 y 28 MPa lo que valida la utilización de redes neuronales artificiales para la obtención de la propiedad del hormigón como es el módulo de elasticidad.

La correlación lineal entre los módulos de elasticidad obtenidos por la red neuronal RNA_E5 y el módulo de elasticidad experimental o real, en el eje de las abscisas se tiene los módulos de elasticidad experimentales obtenidos mediante la normativa A.S.T.M. C 469-94, y en el eje de las ordenadas los módulos de elasticidad pronosticados por la RNA. En la Figura. 16 se observa el comportamiento del modelo de red neuronal diseñada, donde se tiene un coeficiente de correlación R igual a 0.922, lo que indica que la RNA realiza una predicción aceptable del módulo de elasticidad de los diseños de mezclas de 21, 24 y 28 MPa realizados con agregados de la cantera Holcim-Pifo y cemento Holcim tipo GU.

Con lo antes mencionado se puede concluir que el modelo es adecuado y confiable para realizar las predicciones de módulo de elasticidad.

3.5 Comparación de E_c RNA y E_c NEC.15 – ACL.318.19

Con estos resultados pronosticados se evaluó su semejanza con respecto a los valores que recomienda la normativa ecuatoriana de la construcción, en cuanto al factor de relación con el cual se calcula el valor del módulo de elasticidad estimado. Anexo Tabla 13. (Anexo Tabla 14).

$$E_{cNEC} = 4700 * \sqrt{f'c} (MPa) \text{ vs } E_{cRNA} = 4112 * \sqrt{f'c} (MPa)$$

Como se observa existe una diferencia promedio de 12.505% con respecto a la NEC-15 y ACL.318.19, lo que indica un factor de relación en la ecuación de 4112 para la obtención de este parámetro estimado por la RNA. Coincidiendo con varios autores en la importancia de disminuir el valor estimado puesto que las propiedades de los agregados de nuestro país son diferentes a los tomados en cuenta por la normativa extranjera en sus fórmulas empíricas.

4 CONCLUSIONES

La recopilación de información y elaboración de la base de datos para la creación de la Red Neuronal Artificial tiene gran incidencia en el entrenamiento, validación y testeo de la Red Neuronal diseñada ya que esta sirve como entradas (Input) y salidas (Output) para la codificación de la RNA, puesto que no solamente importa la cantidad de datos, sino la calidad de estos, que para la investigación se midieron en base a su coherencia, relevancia y confiabilidad; a través del filtrado de datos realizado, eliminando valores atípicos para que los resultados obtenidos sean satisfactorios.

El uso de métodos estadísticos para la clasificación de datos es de suma importancia al implementar Redes Neuronales Artificiales independientemente del objetivo para el cual se las crea; el método de Tukey o diagramas de caja y bigotes es una excelente alternativa para identificar datos atípicos que puedan interrumpir con el desempeño de las RNA, puesto que al entrenarlas con datos que sean muy dispersos o con poca relación en sus variables y datos semejantes, resultará en la emisión de predicciones erróneas.

Mediante la utilización del software matemático Matlab se diseñó diversas redes neuronales artificiales para la predicción de resistencia a la compresión " $f'c$ " y módulo de elasticidad " E_c " del hormigón de tipo feed forward backpropagation utilizando la herramienta Neural Fitting (nftool) del toolbox con la implementación del algoritmo de Levenberg-Marquardt (Trainlm) para establecer relaciones

entre los conjuntos de datos de entrada con los de salida. Estos modelos fueron evaluados, utilizando indicadores de desempeño como el coeficiente de correlación R en la etapa de evaluación y el cuadrado del coeficiente de determinación R² en la etapa de comprobación.

En el estudio de predicción de propiedades del material, se evaluaron diferentes diseños de redes neuronales para predecir la resistencia a la compresión "f'c" y el módulo de elasticidad "Ec". El diseño óptimo para la predicción de f'c consta de 17 neuronas en la capa de entrada, 20 en la capa oculta y 1 en la capa de salida. Los resultados, obtenidos después de 9 iteraciones en las etapas de entrenamiento, validación y prueba, revelaron un coeficiente de correlación R de 0.96617 (Tabla.9) indicando la efectividad del modelo. En cuanto a la predicción de Ec, el diseño seleccionado incluye 17 neuronas en la capa de entrada, 13 en la capa oculta y 1 en la capa de salida. Los resultados de la red, obtenidos después de 8 iteraciones en las fases de entrenamiento, validación y prueba, mostraron un coeficiente de correlación R de 0.97726 (Tabla.10), lo que sugiere la viabilidad del modelo para predecir esta propiedad del material.

En la creación de modelos predictivos a través de Redes Neuronales Artificiales al utilizar una base de datos amplia y cuya calidad haya sido comprobada a través de un filtrado con métodos estadísticos; independientemente de la arquitectura que se utilice, los resultados que se obtendrán serán cercanos a los experimentales y sus coeficientes de correlación tenderán a la unidad, pero es responsabilidad del programador escoger el modelo que mejor se acople a su necesidad, tomando en cuenta la exactitud a la cual se requieren en el estudio.

En el proceso de comprobación de los valores pronosticados respecto a los valores experimentales o reales para la resistencia a la compresión "f'c" de las resistencias de diseño de 21, 24 y 28 MPa se obtuvieron errores del 13.27%, 2.27% y 1.58% respectivamente (Tabla. 11), y un coeficiente de determinación R² igual a 0.9512 (Figura. 14) lo que nos indica que la estructura de Red Neuronal Artificial diseñada tiene un error menor al 15% al realizar la predicción de la resistencia a la compresión del hormigón.

En el proceso de comprobación de los valores pronosticados respecto a los valores experimentales para el módulo de elasticidad "Ec" de las resistencias de diseño de 21, 24 y 28 MPa se obtuvieron errores del 4.60%, 5.71% y 9.98% respectivamente (Tabla. 12), y un coeficiente de determinación R² igual a 0.922 (Figura. 16) lo que nos indica que la estructura de Red Neuronal Artificial diseñada tiene un error menor al 10% al realizar la predicción del módulo de elasticidad del hormigón. (Anexo Fig.16).

La importancia de obtener coeficientes de determinación altos indica un buen desempeño de los modelos predictivos, puesto que estos disminuyen el error en sus resultados, confirmando la proximidad y confiabilidad de estos.

De acuerdo con el objeto de estudio de la presente investigación sobre la aplicación de redes neuronales artificiales en la predicción de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad del hormigón, se concluye que en base a los resultados se acepta la hipótesis planteada puesto que se obtuvieron resultados de predicción con un nivel de confiabilidad mayor al 94.29% (Tabla. 11) en la resistencia a la compresión "f'c" y mayor al 93.24% (Tabla. 12) en módulo de elasticidad "Ec".

Las redes establecidas poseen un aplicación práctica, pues su base de datos obtenida de tesis y ensayos de laboratorio fue considerada solamente con aquellas dosificaciones en las cuales no se ha modificado la granulometría de los agregados y tampoco se ha realizado la adición de otros componentes diferentes a los convencionales; evidenciando esto en la parte experimental donde al tener un agregado fino cuya tendencia tenía una gran cantidad de gruesos, se logró obtener datos muy precisos entre los pronosticados y los reales.

El módulo de elasticidad del hormigón es una característica muy importante para el diseño y desempeño de las estructuras, pero se obvia su obtención en los ensayos comerciales puesto que la normativa únicamente acepta su uso con la resistencia a la compresión, y su valor se calcula a través de fórmulas preestablecidas para agregados de alta calidad, los cuales no siempre se utilizan en la construcción de las obras en nuestro país, siendo la RNA que se realizó una herramienta a disposición de calculistas para la implementación de Ec más reales en sus diseños que se pretenda utilizar hormigón con agregados del cantón Quito.

Finalmente, se concluye que la utilización de redes neuronales artificiales es un método válido y de utilidad práctica que se puede utilizar en el ámbito profesional en el control de calidad del hormigón, para la estimación o predicción de la resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad del hormigón luego del sustento teórico, implementación de la Red Neuronal Artificial, pruebas de laboratorio, análisis de resultados y comprobación. Así también su implementación en la obtención de otras propiedades que permitan o faciliten datos en base a información real a diseñadores que utilizan este material en sus diseños.

REFERENCIAS

- [1] El Universo, «El hormigón es el más usado para construir viviendas en Ecuador», El Universo, Quito, p. 1, Sep. 14, 2018.
- [2] C. Martínez y A. Hernández, «Predicción de resistencia a compresión del hormigón mediante redes neuronales haciendo uso del agregado de la cantera de Antonio Maceo», Revista de Arquitectura e Ingeniería, vol. 14, n. o 1, pp. 1-17, Feb. 2020, Cuba.
- [3] L. González, A. Guerrero, S. Delvasto y A. Ernesto, «Redes neuronales artificiales para estimar propiedades en estado fresco y endurecido, para hormigones reforzados con fibras metálicas», Cuaderno Activa, n. o 2016, pp. 95- 107, 2017.
- [4] E. Chele, «Determinación del módulo de elasticidad en hormigones estructurales de 21 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera Agres», Universidad Estatal del Sur de Manabí, 2019. [Online]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2011>.
- [5] J. Calderón, Determinación del módulo de elasticidad del hormigón hidráulico de (f_c 21 y 24) MPa, con árido de la cantera Agre s.a. del cantón Portoviejo», tesis de Ingeniería Civil, Universidad Estatal del Sur de Manabí, 2021.
- [6] S. Siami-Namini and A. S. Namin, «Forecasting economics and financial time series: arima vs. lstm», Mar. 2018. Accessed: May 07, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1803.06386>
- [6] E. Fiesler and R. Beale, Handbook of Neural Computation, 1st ed. New York, Routledge, 1997.
- [7] M. A. Villegas, Aplicación de redes neuronales para la predicción de la resistencia a la compresión del concreto según el ensayo de esclerometría, tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 2019.
- [8] M. López Domínguez and J. Ontaneda Culqui, Diseño de mezclas de hormigón aplicando redes neuronales artificiales para diferentes agregados del cantón Quito, provincia de Pichincha, tesis de pregrado, Universidad Central del Ecuador, 2021. [online]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/24621/1/UCE-FING-CIC-LÓPEZ MARCO-ONTANEDA JAIRO.pdf>
- [9] J. Santamaría, L. Morales y J. Pilaluisa, «Modelo para dosificación de mezclas de hormigón utilizando lógica difusa» figempa: Investigación y Desarrollo, vol. 1, n. o 1, pp. 54-61, 2018. doi: 10.29166/revfig.v1i1.815.
- [10] nte inen 1573, «Hormigón de cemento hidráulico. determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico». Norma técnica ecuatoriana, 2010, p. 5. [Online]. Disponible en: <http://normaspdf.inen.gob.ec/pdf/nte/1573.pdf>
- [11] I. Amón Uribe, Guía metodológica para la selección de técnicas de depuración de datos, tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Sistemas, 2010.
- [12] MathWorks, «Matlab». The MathWorks Inc, 2019.
- [13] J. C. Arias Molina, Propuesta de un analizador virtual (soft-sensor) para la predicción del punto final de ebullición del jet y t95 del acpm de la unidad de procesamiento de crudo u150 de la gerencia. Refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A., Universidad Industrial de Santander Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Bucaramanga, 2016. [Online]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/164920.pdf>
- [14] D. Asmal, J. Ocaña, A. Perdomo y J. Pérez, Estudio del módulo de elasticidad estático del hormigón en base a la resistencia a la compresión ($f'_c = 21, 28$ MPa) fabricado con material de la mina de Píntag, Universidad Central del Ecuador, 2012.
- [15] nte inen 1855-2, «Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos». Norma Técnica Ecuatoriana, p. 3, 2015. 41 Ganchala E., et al.
- [16] nte inen 1763, «Hormigón de cemento hidráulico. Muestreo». Norma Técnica Ecuatoriana, pp. 1-12, 2010, [Online]. Disponible en: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1338-3.pdf>

Anexos

Tabla 6

Variables capa de salida

N.º	Capa	Variable
1	SALIDA	Resistencia a la compresión del hormigón (f_c)
2	SALIDA	Módulo de elasticidad del hormigón (E_c)

Nota. Esta tabla muestra las variables de salida o resultados que se obtendrá producto de la RNA.

Tabla 7

Propiedades de los agregados y cemento

Descripción	Arena	Ripio	Unidad
D _{ss}	2,64	2,52	g/cm ³
% Absorción	2,52	3,31	%
% Humedad	0,43	0,78	%
D _{ap} Compactada	1,68	1,47	g/cm ³
D _{ap} Suelta	1,53	1,37	g/cm ³
Módulo Finura	3,07	5,82	ad
% óptimo de mezcla	41	59	%

Descripción	Valor	Unidad
Densidad óptima de la mezcla	1.78	g/cm ³
Densidad máxima de la mezcla	1.80	g/cm ³
Densidad del cemento	2.81	g/cm ³

Tabla 8

Valores de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad característicos.

CILINDRO	21 MPa		24 MPa		28 MPa	
	RESISTENCIA	MÓDULO DE ELASTICIDAD ASTM 469	RESISTENCIA	MÓDULO DE ELASTICIDAD ASTM 469	RESISTENCIA	MÓDULO DE ELASTICIDAD ASTM 469
N °	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
1	21,31	21213,12	21,31	21213,12	29,18	20266,68
2	25,42	19656,75	25,42	19656,75	29,8	21452,28
3	24,39	19770,74	24,39	19770,74	32,85	22481,77
4	23,57	19830,51	23,57	19830,51	30,19	22190,26
5	21,72	20514,92	21,72	20514,92	29,87	22423,41
6	22,66	19298,13	22,66	19298,13	31,83	20704,44
7	24,9	19797,32	24,9	19797,32	29,22	21275,48
8	22,97	17754,96	22,97	17754,96	30,38	21667,08
9	20,74	20904,67	20,74	20904,67	28,22	22173,91
10	25,35	20296,46	25,35	20296,46	28,18	22468,29
PROMEDIO	23,3	19903,76	23,3	19903,76	29,97	21710,36
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,7	961,68	1,7	961,68	1,47	780,09
COEFICIENTE VARIACIÓN	0,07	0,05	0,07	0,05	0,05	0,04
VALOR CARACTERÍSTICO	23,27	19887,99	23,27	19887,99	29,95	21697,57

Tabla 9

Resumen de los modelos de redes neuronales artificiales para f'c

RED NEURONAL ARTIFICIAL	ARQUITECTURA			COEFICIENTE DE REGRESIÓN				R ²
	Capa Entrada	Capa Oculta	Capa de Salida	Training	Validation	Test	All	
RNA_1	17	10	1	0.95232	0.92355	0.9666	0.94967	0.945
RNA_2	17	15	1	0.98405	0.95574	0.90756	0.9671	0.9232
RNA_3	17	20	1	0.98289	0.91103	0.95316	0.96617	0.9512
RNA_4	17	25	1	0.98022	0.95441	0.93279	0.96677	0.9623
RNA_5	17	50	1	0.9791	0.91071	0.88776	0.95458	0.9422

Tabla 10Resumen de los modelos de redes neuronales artificiales para E_c

RED NEURONAL ARTIFICIAL	ARQUITECTURA			COEFICIENTE DE REGRESIÓN				R ²
	Capa Entrada	Capa Oculta	Capa de Salida	Training	Validation	Test	All	
RNA_E1	17	10	1	0.98477	0.9704	0.95224	0.97717	0.5693
RNA_E2	17	15	1	0.97815	0.9729	0.9762	0.97715	0.8169
RNA_E3	17	25	1	0.98115	0.97162	0.96443	0.97673	0.7530
RNA_E4	17	17	1	0.97506	0.98313	0.98097	0.97725	0.816
RNA_E5	17	13	1	0.98047	0.96755	0.97429	0.97726	0.9220

Tabla 11

Comparación de resultados $f'c$ experimental y $f'c$ pronosticado por RNA

f'c Diseño (MPa)	Edad (Días)	F'c Experimental (MPa)	F'c Pronosticado (MPa)	Error (MPa)	Error %	Promedio %
21	28	24.50	21.25	3.250435	13.27	
24	28	26.20	25.61	0.5942735	2.27	5.71
28	28	31.80	31.30	0.503524	1.58	

Tabla 12

Comparación de resultados E_c experimental y E_c pronosticado por RNA

f'c Diseño (MPa)	Edad (Días)	Ec Experimental (MPa)	Ec Pronosticado RNA_5 (MPa)	Error (MPa)	Error %	Promedio %
21	28	19887,98	20803	915,02	4,60	
24	28	21333,12	20114	1219,12	5,71	6.76
28	28	21697,57	19533	2164,56	9,98	

Tabla 13

Valores del módulo de elasticidad mediante la RNA y NEC - 15

f'c Diseño (MPa)	Ec Pronosticado RNA (MPa)	Ec NEC (MPa)	Diferencia (MPa)	Diferencia %	Promedio %
21	20803	21538.11	735.11	3413%	
24	20114	23025.2	2.911.204	12644%	12505%
28	19533	24870.06	5.337.062	21460%	

Tabla 14

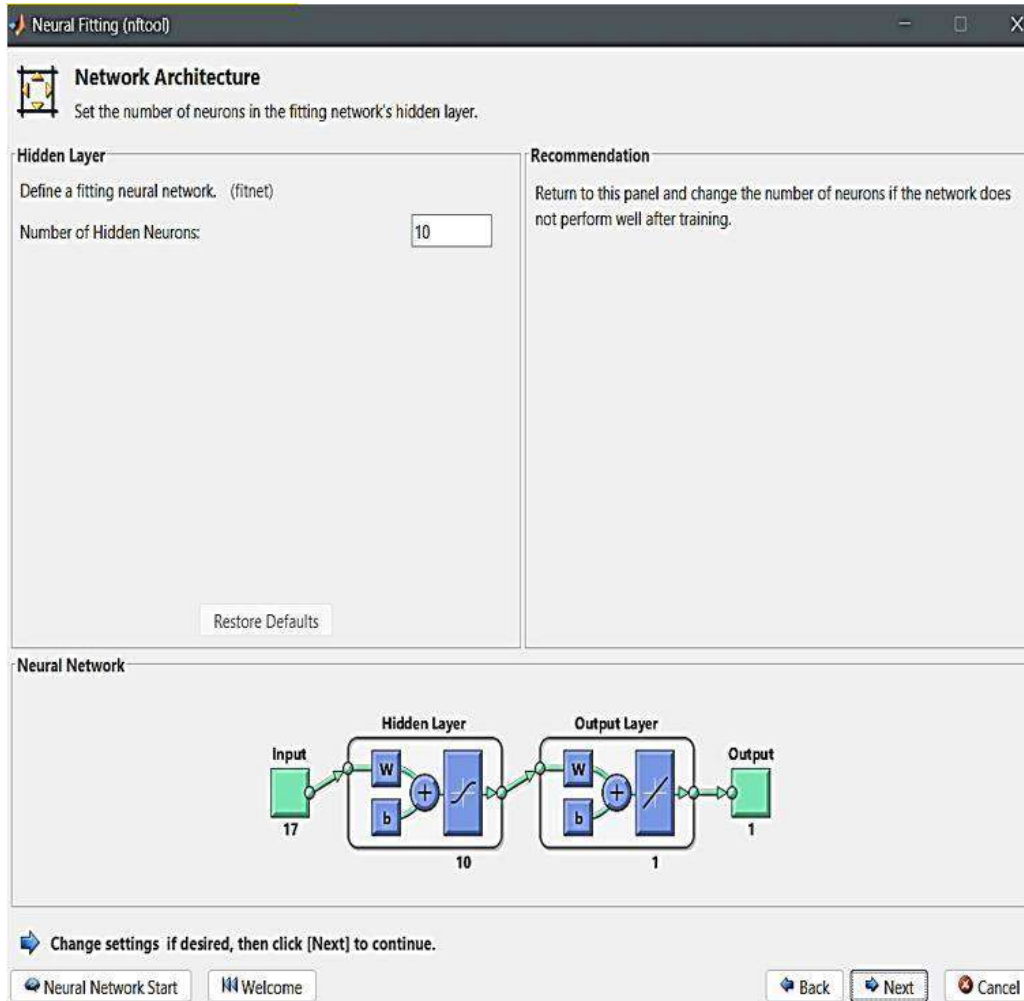
Factor obtenido de RNA

f'c Diseño (MPa)	Ec Pronosticado RNA (MPa)	Factor	Factor promedio
21	19533	4.539.587	
24	20114	4.105.753	4112
28	20803	3691.39	

Anexo

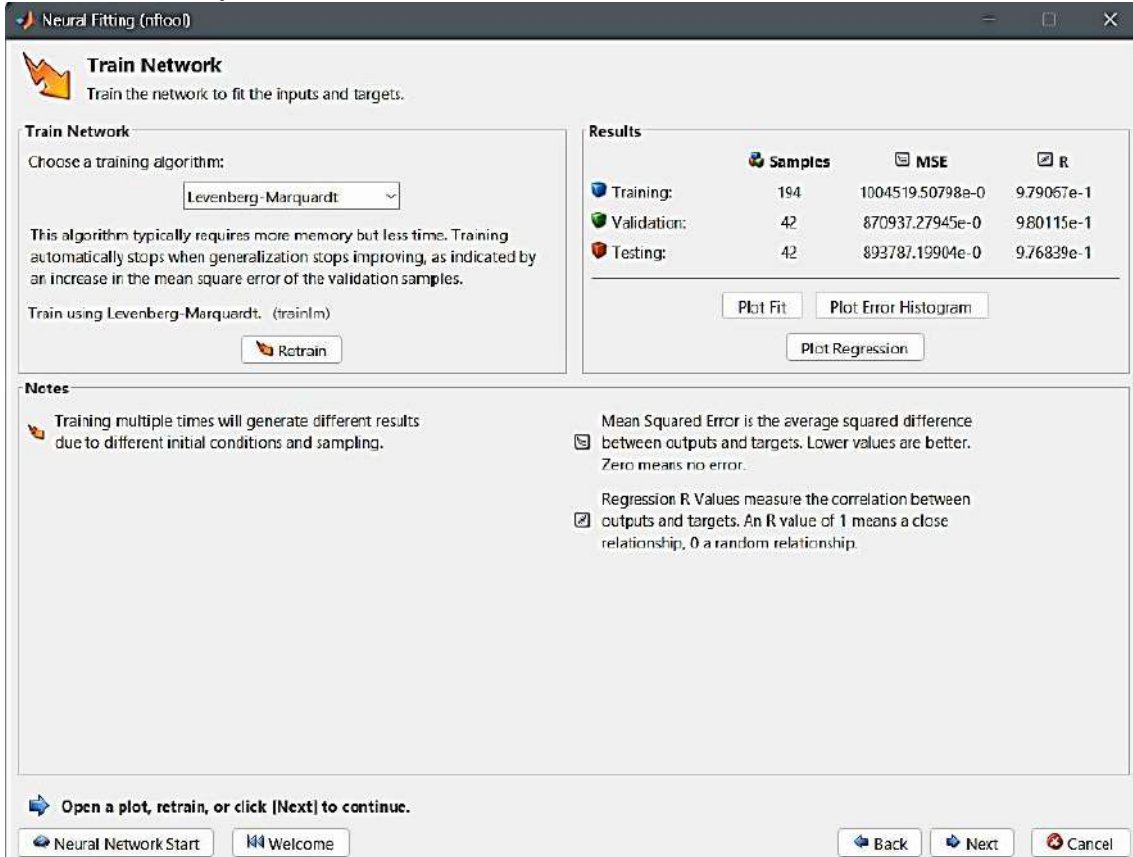
Figura. 6

Arquitectura de la Red Neuronal Artificial



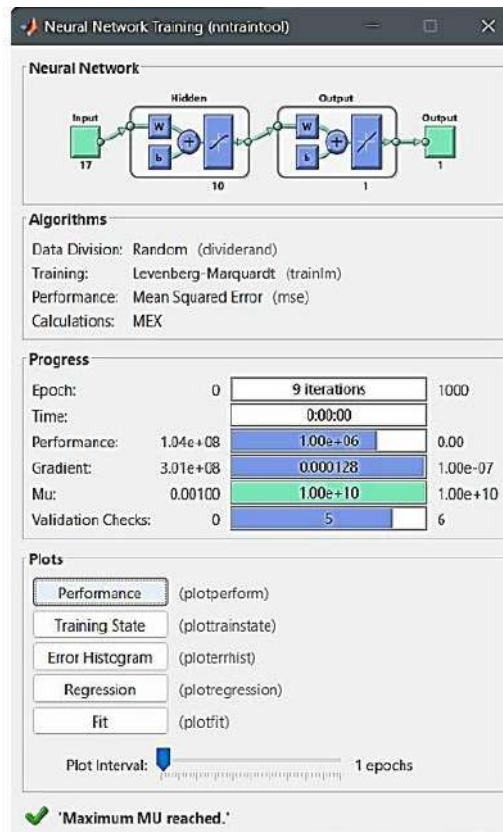
Nota: Se observa la interfaz y la arquitectura de la red neuronal como son la capa de entrada, número de neuronas y capa de salida. Matlab [12].

Figura. 7
Arquitectura de la Red Neuronal Artific



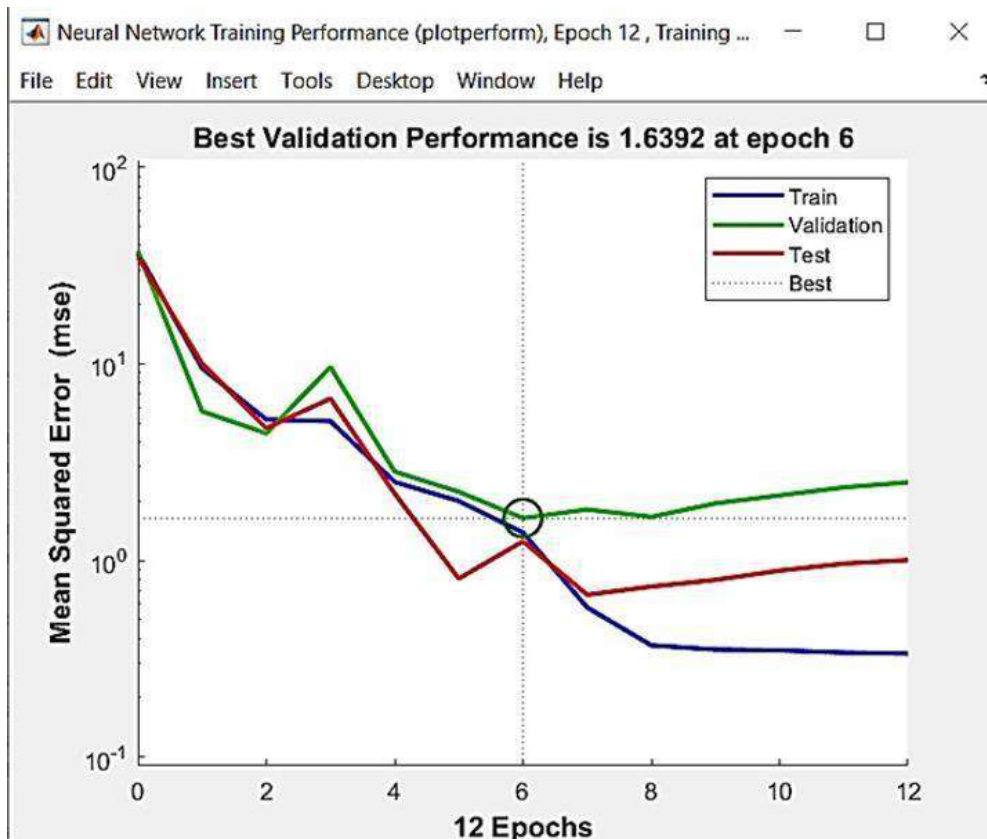
Nota: Se observa la interfaz de entrenamiento de la red neuronal artificial. Matlab [12]

Figura. 8
Resultados entrenamiento de la red neuronal



Nota: Se observa los resultados del entrenamiento de la RNA, así como también los gráficos o plots. Matlab [12].

Figura. 9
Error cuadrático medio (MSE)



Nota: La gráfica representa el error cuadrático medio vs número de iteraciones. Matlab [12].

Figura. 10
Regresión Lineal

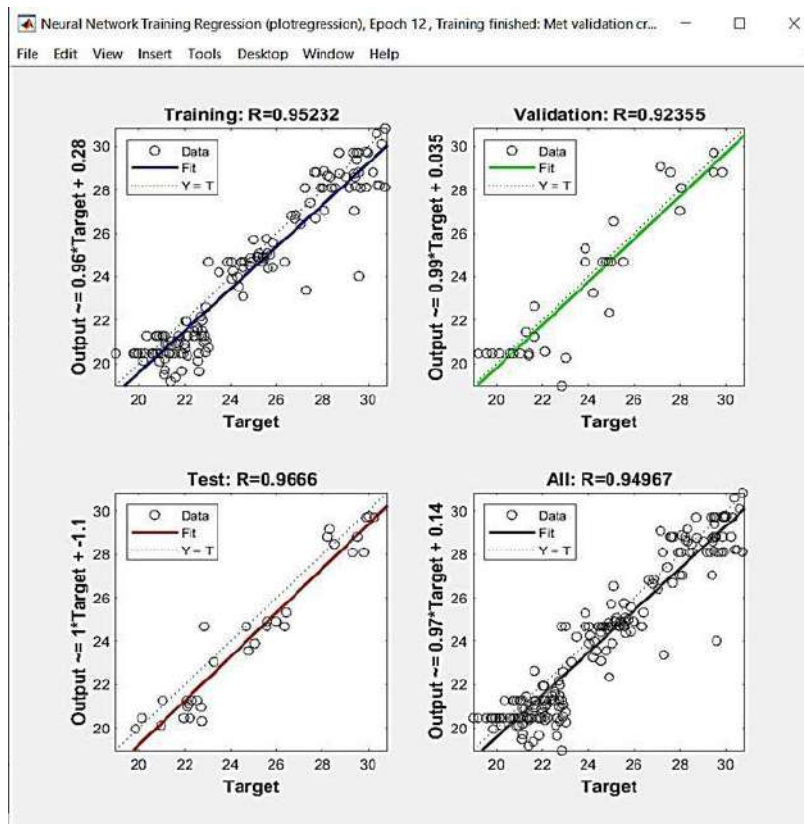


Figura. 11
Regresión para los datos de entrenamiento, validación, test y total de datos la RNA_3

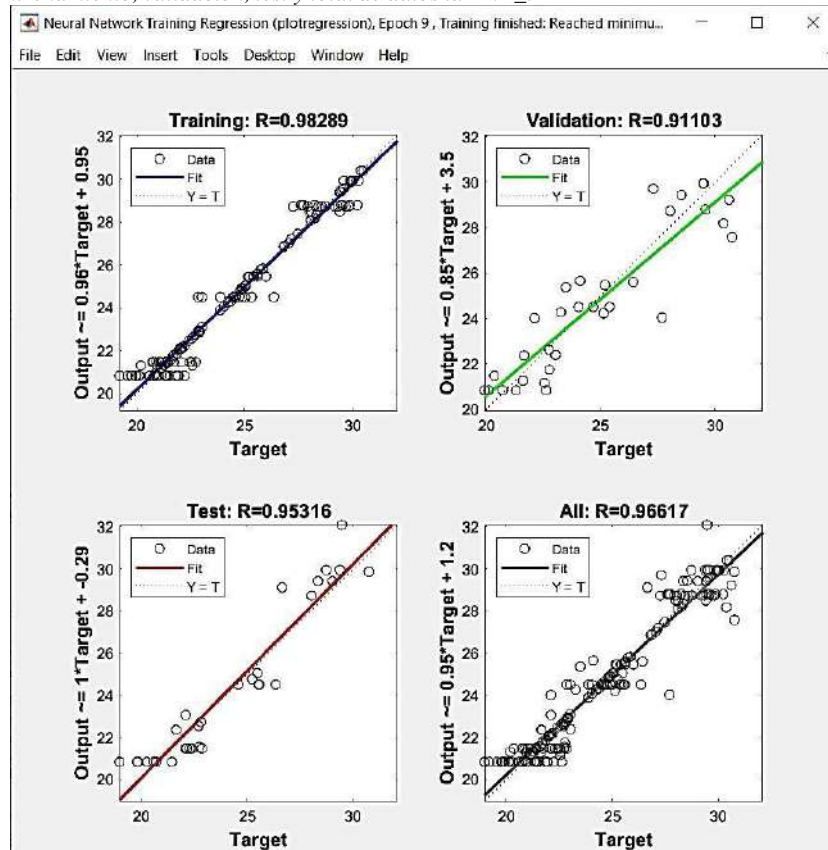


Figura. 12
Regresión para los datos de entrenamiento, validación, test y total de datos la RNA_5

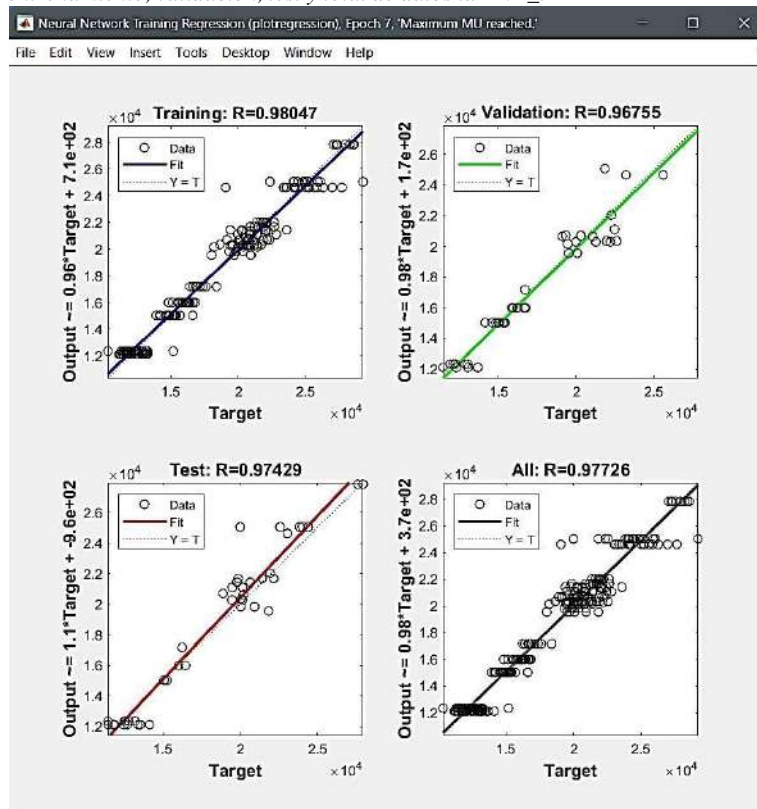
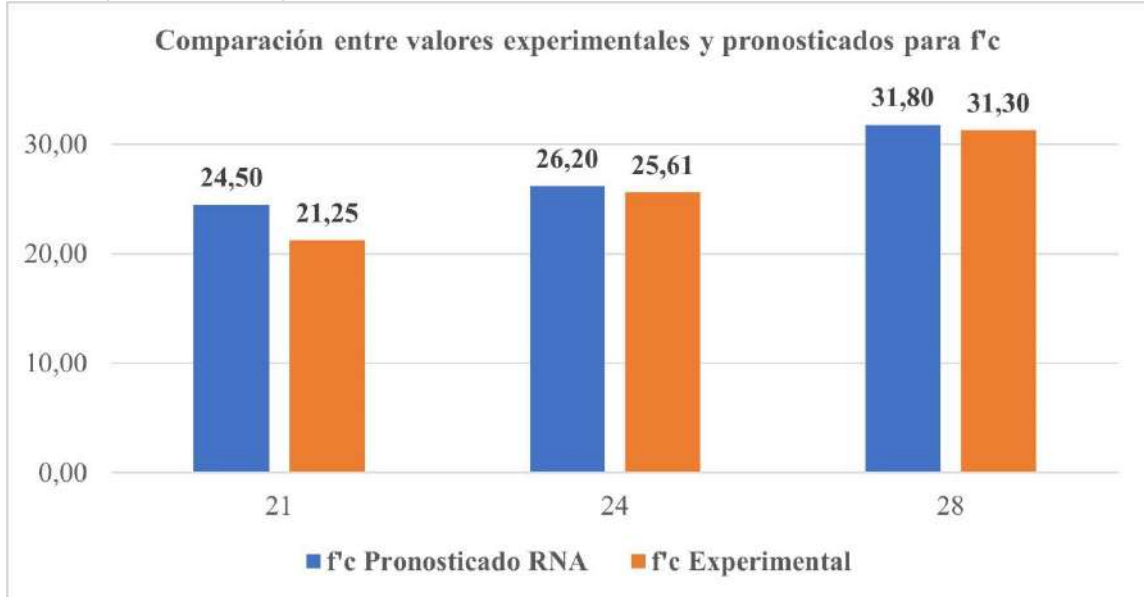


Figura. 13

Comparación de resultados $f'c$ experimental y $f'c$ pronosticados por RNA

**Figura. 14**

Comparación de resultados $f'c$ experimental y $f'c$ pronosticados por RNA

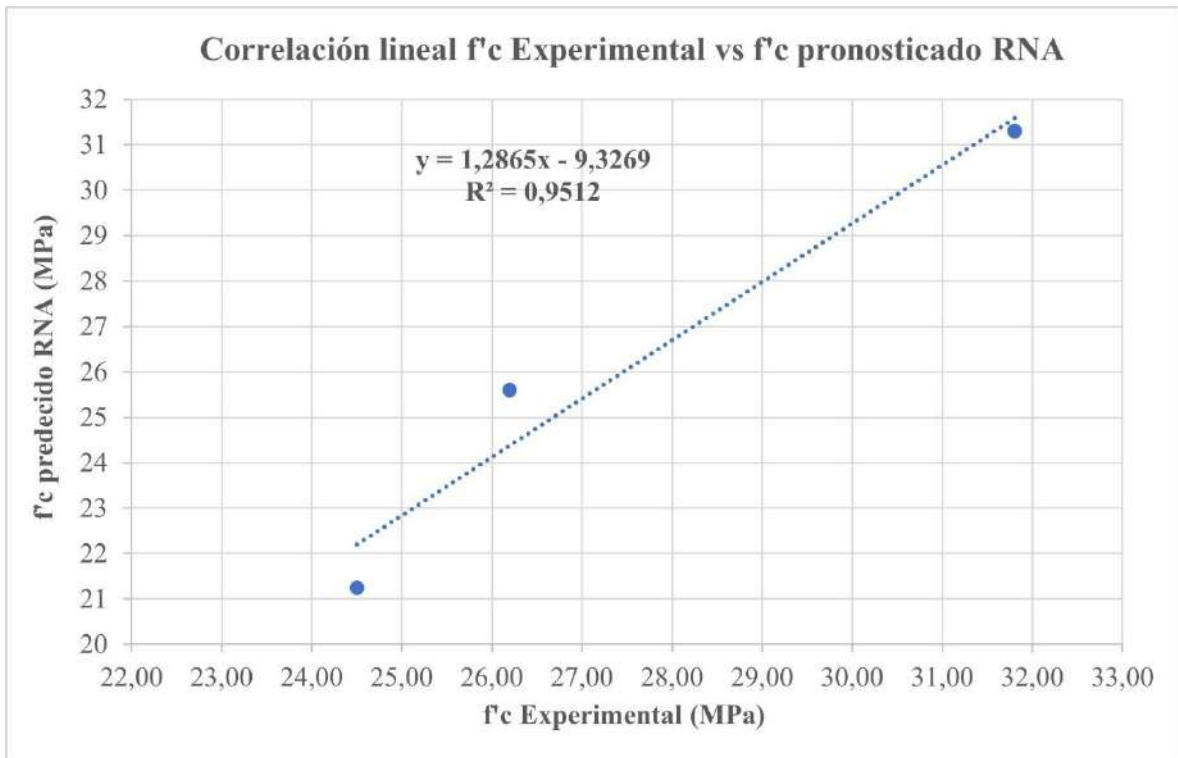


Figura. 15

Comparación de resultados E_c experimental y E_c Pronosticado por RNA

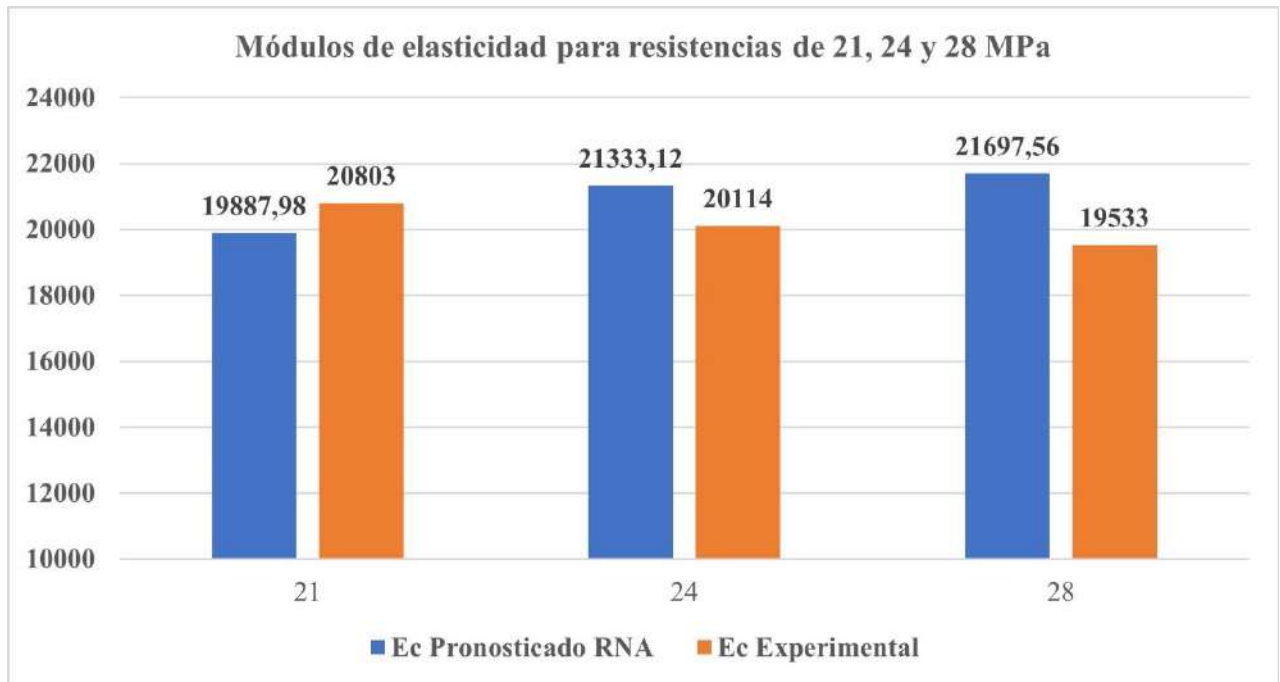
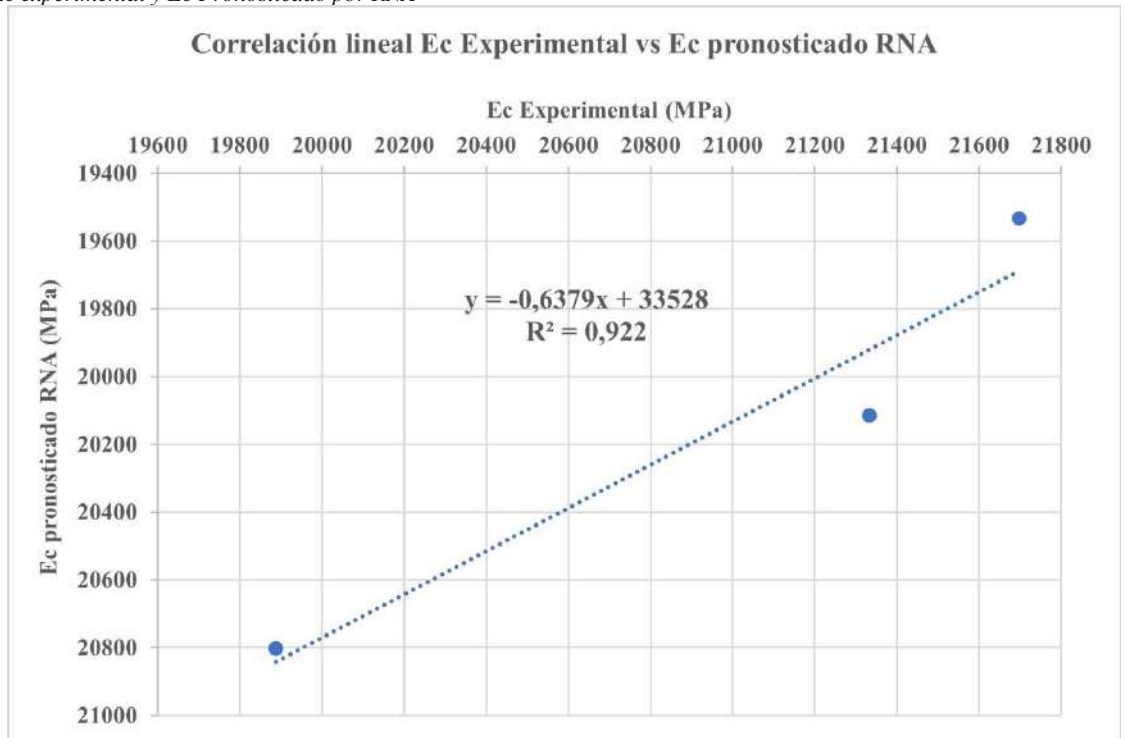


Figura. 16

Comparación de resultados E_c experimental y E_c Pronosticado por RNA





REVISTA INGENIO

Análisis de Flujo AC Aplicados a un Sistema Eléctrico de Potencia

Analysis of AC Flow Applied to an Electric Power System

Alexander Emanuel Torres Romero 1 | [ID](#) Grupo de Investigación SMART-TECH, Guayaquil (Ecuador)

David Humberto Cárdenas Villacres 2 | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)

Raquel de los Angeles Salas Ibarra 3 | [ID](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 18/09/2023

Recibido tras revisión:

06/10/2023

Aprobación: 06/11/2023

Publicación: 15/01/2024

PALABRAS CLAVE

Corriente alterna, ACS712, SEP, flujo de potencia, sistema eléctrico de potencia.

ARTICLE HISTORY

Received: 13/10/2023

Received after revision:

13/11/2023

Approved: 04/12/2023

Publication: 01/15/2024

KEY WORDS

Alternating Current, ACS712, SEP, Power Flow, Power Electrical System.

RESUMEN

En la actualidad, la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Guayaquil campus Centenario, se enfrenta a limitaciones de recursos para enseñar el análisis de corriente alterna en Sistemas Eléctricos de Potencia. El objetivo de la presente investigación es proponer y validar prácticas de laboratorio que permitan analizar la corriente alterna en SEP. Se usa metodología experimental y cuantitativa. Las ecuaciones de flujo de potencia y los métodos analíticos de Gauss-Seidel y Newton-Raphson permiten encontrar los valores teóricos. Este estudio construye un módulo de prácticas que realiza análisis de flujo utilizando herramientas como Matlab, Simulink, Arduino y ACS712. Este módulo emula y analiza la corriente alterna en un SEP. Como resultado de las cargas inductivas y capacitivas aplicadas al módulo, se obtienen valores de corriente, inductancia, voltaje de fase y corriente de fase teóricos, simulados y medidos.

ABSTRACT

Currently, the Electrical Engineering career at the Salesian Polytechnic University, Guayaquil campus Centenario, faces resource limitations to teach the analysis of alternating current in Electrical Power Systems. The objective of this research is to propose and validate laboratory practices that allow the analysis of alternating current in SEP. Experimental and quantitative methodology is used. The power flow equations and the analytical methods of Gauss-Seidel and Newton-Raphson allow finding the theoretical values. This study builds a practice module that performs flow analysis using tools such as Matlab, Simulink, Arduino and ACS712. This module emulates and analyzes alternating current in an SEP. As a result of inductive and capacitive loads applied to the module, theoretical, simulated and measured current, inductance, phase voltage and phase current values are obtained.

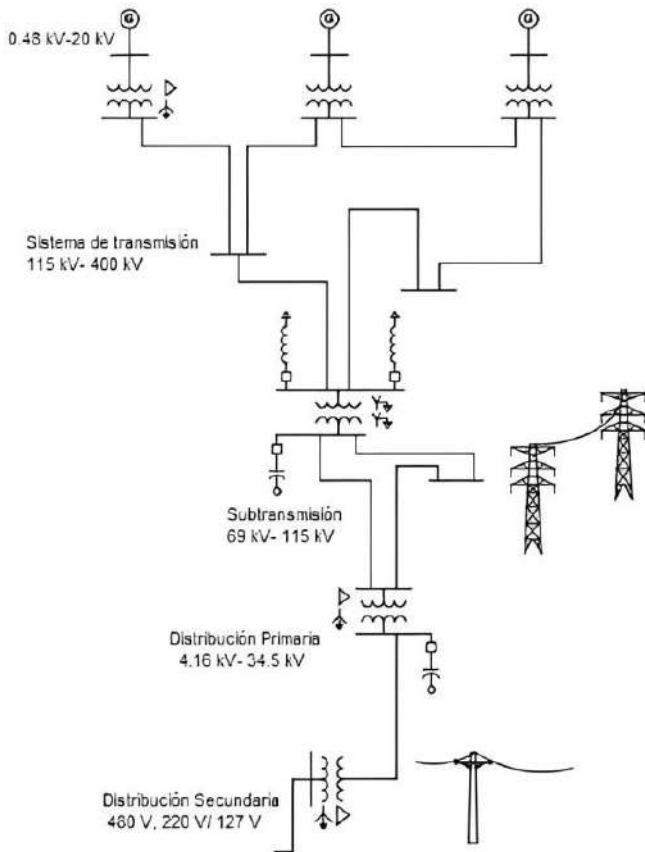
1. INTRODUCCIÓN

El análisis de flujo de potencia es una técnica utilizada en ingeniería eléctrica para evaluar el comportamiento de los sistemas de potencia. Esta herramienta proporciona información crucial acerca de las variables de potencia, que incluyen la potencia activa y la potencia reactiva. En un circuito de corriente alterna, la potencia activa se refiere a la cantidad de energía que se transforma en trabajo y se disipa en las líneas de transmisión, la potencia reactiva representa la energía que no se aprovecha en una instalación eléctrica y se requiere para generar el campo

magnético necesario en dispositivos inductivos como motores y transformadores, así como el campo eléctrico asociado a las capacitancias del sistema. Estos componentes de potencia interactúan conjuntamente en el análisis de flujo de potencia. Al llevar a cabo este análisis, se obtienen los fasores de voltaje en cada punto del sistema y las corrientes en cada conductor de este. Estos fasores representan la magnitud y fase de las variables eléctricas, permitiendo comprender y visualizar la distribución de voltajes en las barras de conexión y las corrientes en los conductores del sistema [1].

Figura 1.

Esquema de un sistema eléctrico de potencia



Nota: [1]

La dirección y el flujo de potencia en cada línea de un sistema eléctrico como se observa en la Figura 1. son aspectos de gran importancia, ya que es necesario determinar si la potencia se está generando o absorbiendo, así como conocer los valores de voltaje y corriente asociados [2]. Otro factor fundamental es la determinación de la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra del sistema, así como las potencias activas y reactivas que fluyen a través de cada línea. Estos aspectos se vuelven evidentes durante el análisis de flujo de potencia [3]. Por ello, esta investigación en el área de potencia es de vital importancia para la planeación y diseño de implementación de próximos sistemas de potencia, así como también la determinación para optimizar las operaciones de los sistemas ya existentes; según la literatura [4], menciona que con el crecimiento rápido de internet de la energía la penetración de los recursos energéticos está aumentando, proponer un método modificado que tiene en cuenta la corrección aritmética, la estructura en bucle semanal y los distintos tipos de GD. La principal información que se obtiene de los estudios de flujo es: la magnitud y el ángulo de la fase de cada voltaje

de barra, junto a los tipos de potencias real y reactiva que fluyen en cada línea, de igual manera se puede analizar por medio de la salida ya impresa de los programas que suelen emplear las compañías eléctricas de generación [5].

En las empresas eléctricas, el flujo de potencia óptimo en corriente alterna (AC-OPF) es una herramienta crucial para determinar el funcionamiento óptimo de los diversos recursos. El problema AC-OPF generalmente se resuelve mediante una formulación de equilibrio de potencia que incluye ecuaciones de tensión y potencia [5].

En el modelo de corriente alterna de flujo de potencia, se utilizan ecuaciones algebraicas no lineales para representar la inyección de potencia activa y reactiva en cada nodo [6]. Sin embargo, en ciertos casos, se puede simplificar el problema asumiendo que las magnitudes de voltaje en las barras son constantes, lo que hace que los flujos de potencia reactiva sean insignificantes. Estos enfoques desempeñan un papel importante en el funcionamiento óptimo de los sistemas eléctricos de potencia, ya que ayudan a satisfacer las limitaciones operativas y determinar su rendimiento óptimo [7]. Gracias a sus numerosas ventajas, incluido el flujo de potencia bidireccional, el aislamiento galvánico, el bajo rizado de la corriente de salida y la conmutación suave interna, los convertidores trifásicos de doble puente activo (DAB3) son una topología muy utilizada en aplicaciones de carga [8]. baterías. Estas aplicaciones suelen utilizar tres transformadores monofásicos como enlace de CA para simplificar la fabricación y reducir costos. Para lograr una alta densidad de potencia, se puede utilizar la inductancia de fuga de estos transformadores en lugar de la inductancia de fuga externa. La suposición de uniformidad de estas inductancias, sin embargo, no siempre es precisa porque pueden cambiar significativamente durante la fabricación [9].

Utiliza una técnica de protección [10] basada en el aprendizaje automático (ML) para MGs de CA fundamentada en IIDGs utilizando características novedosas para detectar y clasificar fallas simétricas y asimétricas. Las simulaciones electromagnéticas de transitorios en DIGSILENT PowerFactory se utilizan para obtener 400 muestras de diferentes señales para variaciones en las condiciones de funcionamiento de una MG. Después de recuperar y preprocesar las señales, se utilizan diez métodos distintos de extracción de características para obtener 100 características. Esto incluye la nueva métrica de picos y el factor máximo. Uno de los estudios esenciales en la planificación y el funcionamiento de una microrred es el flujo de potencia (FP). Los métodos tradicionales de FP

no son aplicables a las microrredes en isla controladas por droop debido a la ausencia de un bus de holgura en el sistema. Las características de estado estacionario del sistema, como la frecuencia, las tensiones de bus, la potencia de salida de los generadores distribuidos (GD) y la demanda real de las cargas, se obtienen en función de las características de estatismo de los GD y de la dependencia de la frecuencia y la tensión de la carga. Por lo tanto [11] propone un método Newton Raphson mejorado (ENR) para la FP en las microrredes en isla controladas por droop. Los valores de tensión nodal en los sistemas eléctricos se pueden encontrar utilizando el problema de flujo de carga (PFC) en las redes de distribución eléctrica. Estos valores, junto con los parámetros del sistema, son útiles para identificar los índices operativos (técnicos, económicos y ambientales) y las restricciones que describen el comportamiento del sistema en un escenario de carga establecido. Debido a la naturaleza no lineal y no convexa de su modelo matemático, la solución de LFP requiere la implementación de métodos numéricos [12].

En la literatura se presenta un método iterativo para resolver las ecuaciones de flujo de potencia que comienzan con la creación de funciones no lineales para cada nodo. El método sugerido produce funciones N-1 no lineales que se resuelven iterativamente para lograr la convergencia en las tensiones de cada nodo del sistema de potencia. Como lo demuestra el análisis de convergencia, el método iterativo de dos pasos es de cuarto orden. En el primer paso de este trabajo se utiliza la fórmula original del método Newton-Raphson y el método de tipo Halley. Dichas ecuaciones nos permiten el cálculo de los valores teóricos a obtener [13].

2. MÉTODO

Este trabajo tiene como objetivo brindar al estudiante una comprensión más profunda de los casos reales que surgen en las líneas de transmisión, los cuales son llevados a escala en un laboratorio. Se busca estudiar los fenómenos que pueden ocurrir cuando hay un flujo de corriente en conductores de medio y largo alcance.

Un ejemplo claro de estos flujos de corriente se puede observar en la figura 1, que muestra el anillo interconectado del sistema de transmisión de 500kV en Ecuador. Este sistema es responsable de transportar energía limpia generada por centrales hidroeléctricas como Coca Codo Sinclair y Sopladora. Estas centrales están actualmente en funcionamiento y juegan un papel crucial al satisfacer la demanda del servicio de energía

eléctrica, brindando condiciones de calidad y confiabilidad superiores.

Figura 2.
Sistema de transmisión de 500KV



Nota:[14]

Para tener un mejor entendimiento del módulo, este está dividido en 4 etapas representadas en la figura 3.

Figura 3.
Hardware y software empleados.

SOFTWARE	MÓDULOS	FUENTE	MEDIDORES Y ENLACES
MATLAB	MÓDULO DE PRUEBAS CIRCUITOS ELÉCTRICOS	VARIADOR DE VOLTAJE ALTERNO DE 14 kVA	MEGA ARDUINO
SIMULINK			TRANSFORMADOR DE CORRIENTE
IDE ARDUINO	MÓDULO DE CARGA RESISTIVA DE 4kVA		MULTÍMETRO

Software: Matlab-Simulink.

En este software, fueron ingresadas las ecuaciones que forman parte de un SEP tales como:

Potencia compleja S .

$$S = P + jQ = VI^* \quad (1)$$

Potencia S conjugado complejo.

$$S_S = P_S + jQ_S = V_S I^* \quad (2)$$

Representación vectorial de la corriente I .

$$I = \frac{1}{jX} (V_S - V_R) \quad (3)$$

Representación de I conjugado.

$$I^* = \frac{1}{-jX} (V_S^* - V_R^*) \quad (4)$$

Al sustituir la Ecuación 4 en la Ecuación 2 se consigue:

Potencia S_S conjugado complejo con sus términos.

$$S_S = \frac{V_S^*}{-jX} (V_S - V_R) \quad (5)$$

Del diagrama fasorial, se observa

$$\begin{aligned} V_R &= |V_R| \angle 0^\circ \\ V_R &= V_R^* \\ V_S &= |V_S| \angle \delta \end{aligned} \quad (6)$$

La ecuación 5 se convierte en:

$$S_S = \frac{|V_S|^2 - |V_R||V_S|e^{j\delta}}{-jX} \quad (7)$$

Potencia compleja S_S en su forma fasorial.

$$S_S = \frac{|V_S||V_R|}{x} \sin\delta + j \frac{1}{x} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos\delta) \quad (8)$$

Finalmente, de la $S_S = P_S + jQ_S$ se puede despejar P_S y Q_S respectivamente

Potencia Real.

$$P_S = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \sin\delta) W \quad (9)$$

Potencia reactiva.

$$Q_S = \frac{1}{x} (|V_S|^2 - |V_S||V_R| \cos\delta) VAR \quad (10)$$

De igual forma, en el extremo receptor se tiene:

Potencia S_R conjugado complejo en el Receptor.

$$\begin{aligned} S_R &= P_R + jQ_R \\ S_R &= V_R I^* \end{aligned} \quad (11)$$

Se aplica el procedimiento anterior y se obtiene:

Potencia Real en el Receptor.

$$P_R = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \sin\delta) W \quad (12)$$

Potencia Reactiva en el Receptor.

$$Q_R = \frac{1}{x} (|V_S||V_R| \cos\delta - |V_R|^2) VAR \quad (13)$$

Potencia Real Máxima en el Receptor.

$$\begin{aligned} P_{R(\max)} &= P_{S(\max)} \frac{|V_S||V_R|}{x} \\ Q_{prom} &= \frac{1}{2} (Q_S + Q_R) \end{aligned} \quad (14)$$

Potencia Reactiva Promedio.

$$Q_{prom} = \frac{1}{2x} (|V_S|^2 - |V_R|^2) VAR \quad (15)$$

Potencia Real en la línea.

$$P_{linea} = |I|^2 R W \quad (16)$$

De la ecuación 2, se tiene que:

$$I^* = \frac{P + jQ}{V}$$

$$I = \frac{P - jQ}{V^*}$$

Entonces,

Multiplicación entre I y I^*

$$II^* = |I|^2 \frac{P^2 + Q^2}{|V|^2} \quad (17)$$

En la ecuación 14, se reemplaza:

Potencia en la línea.

$$P_{linea} = \frac{(P^2 + Q^2)R}{|V|^2} W \quad (18)$$

Potencia aparente en el Segundo Conductor.

$$S_2 = V_2 I^* \quad (19)$$

Donde despejando I se obtiene:

Corriente en el sistema.

$$I = \frac{S_2}{V_2} \quad (20)$$

El Voltaje de alimentación V_1 se define como:

Voltaje de Alimentación.

$$V_1 = V_2 + Z_e I \quad (21)$$

Reemplazando la ecuación 18 en 19 obtenemos la ecuación que representará al voltaje V_2 :

Voltaje V_2 .

$$V_2 = V_1 + Z_e \frac{S_2}{V_2} \quad (22)$$

Voltaje V_2 Algorítmica.

$$V_2^{(k)} = V_1 - Z_e \frac{S_2}{(V_2^{(k-1)})} \quad (23)$$

A continuación, son presentados los bloques de Simulink que conforman la propuesta. Fig. 4, Fig.5 y Anexo Fig. 6.

Figura 4.

Esquema de modelos de línea corta y barra de carga.

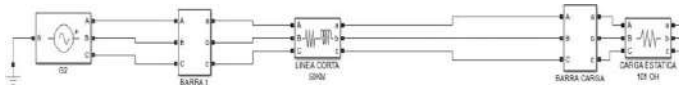
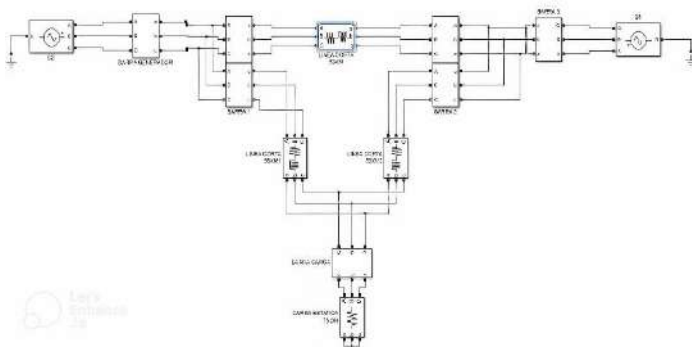


Figura 5.

Esquema de modelo de doble larga y doble líneas cortas



Construcción del módulo de pruebas

Antes de poder llevar a cabo la validación de las simulaciones obtenidas a partir de las programaciones previas, fue necesario realizar una etapa preliminar de captura de datos de voltaje y corriente. Para ello, se diseñó y construyó un módulo de pruebas específicamente diseñado para este propósito, el cual se describirá en detalle en esta sección.

En la figura 7, se presenta la vista frontal de este módulo de pruebas de circuitos eléctricos. Este dispositivo ha sido cuidadosamente diseñado para proporcionar una plataforma de pruebas confiable y precisa, que permita la medición precisa de las variables eléctricas relevantes para la validación de las simulaciones.

El módulo de pruebas cuenta con una variedad de elementos y componentes que garantizan una captura de datos precisa y confiable. Entre ellos, se destacan los puntos de conexión para los cables de medición de voltaje y corriente, así como los dispositivos de protección

adecuados, como fusibles y dispositivos de seguridad, para garantizar la integridad del sistema durante las pruebas.

Además, el módulo de pruebas ha sido diseñado de manera ergonómica y fácil de usar, con controles e indicadores claros que permiten al usuario monitorear y ajustar las condiciones de prueba según sea necesario. Esto garantiza una operación eficiente y una mayor precisión en la captura de datos. Anexo Fig. 7.

Las configuraciones de carga incorporadas en el módulo tienen la capacidad de simular, a una escala controlada, los efectos de las pérdidas de voltaje que se manifiestan en las líneas de transmisión. Esto se logra mediante la representación de estos fenómenos en forma de circuitos que incorporan elementos resistivos, capacitivos e inductivos, también conocidos como circuitos RLC. Estas configuraciones permiten la extracción de las variables esenciales que caracterizan un sistema eléctrico, tal como se detalla en la tabla 1.

La inclusión de componentes resistivos, capacitivos e inductivos en el módulo como se observa en la Figura 7. Permite una representación más precisa de los fenómenos de pérdida de voltaje en líneas de transmisión. Los elementos resistivos simulan las pérdidas de energía en forma de calor, los capacitivos simulan las reacciones ante cambios de carga y los inductivos simulan la propiedad de almacenamiento magnético de las líneas.

La simulación y escalada proporciona una comprensión práctica y cuantificable de cómo estos componentes afectan las pérdidas de voltaje. Los resultados obtenidos, que se muestran en la Tabla 2. Permiten evaluar cómo cada componente influye en la calidad y eficiencia de la transmisión eléctrica, así como cómo se manifiestan las propiedades eléctricas fundamentales, como la resistencia, la reactancia y la impedancia.

Tabla 1.

Variables de un sistema eléctrico

Cantidad	Símbolo	Magnitud
Corriente	\bar{I}	Amperes
Voltaje	\bar{V}	Voltios
Potencia	$\bar{S} = P + jQ$	Volt-Amperes
Impedancia	$Z = R + jQ$	Ohmios
Factor de Potencia	$F * P = PCos\phi$	Adimensional
Tiempo	T	Segundos

Medidores

Para poder capturar los datos en tiempo real ha sido

necesario crear y construir un circuito que nos permita captar las señales eléctricas como voltaje y corriente para poder digitalizarla y llevarlas a los objetos de simulación a la computadora. Para esta acción fue empleada la tarjeta electrónica Mega Arduino en conjunto con el sensor ACS712 capaz de soportar valores de 5 a 30A. Anexo Fig. 8.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba a la cual fue sometido el módulo fue el análisis del flujo de corriente en un circuito en serie de una resistencia y un inductor con cara resistiva.

La prueba consiste en conectar una resistencia de 750 ohmios y un inductor de 0.4 uf con una carga resistiva de 400V trifásicos. Posterior al conexionado se mide los parámetros eléctricos usando software Arduino y el multímetro.

Durante esta práctica, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de los voltajes y corrientes en múltiples puntos del diagrama, cuya representación es presentada en la Figura 9.

Al conectarlo con componentes reales, como un motor trifásico y un banco de resistencias, este módulo se ha sometido a condiciones prácticas. El flujo de corriente en un sistema con doble alimentación es el objetivo principal de estas pruebas. La medición y el análisis de voltajes y corrientes en áreas específicas del sistema son particularmente importantes.

Tabla 2.
Valores teóricos y medidos en el tablero

	BARRA 1/2		BARRA 2/3		BARRA 1/3		CARGA		FUENTE	
	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO	V. TEORICO	V. MEDIDO
RESISTENCIA (Ω)	300	292	750	747	750	749	750	121	---	---
INDUCTOR (mH)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	---	---
CORRIENTE DE FASE (mA)	0	0,04	140.09	118,6	140.09	115,5	-	231,5	---	---
VOLTAJE DE FASE (V)	0	0	107.1	105.04	107,1	105.04	28.29	28.503	231	231

4. CONCLUSIONES

La implementación del módulo de pruebas de circuitos eléctricos (Figura 1.), brinda a los estudiantes una oportunidad valiosa para aplicar de manera práctica la teoría que han aprendido en las aulas. Lo que fomenta una comprensión más profunda y una conexión clara entre la teoría y su aplicación práctica.

Esto proporciona datos cruciales que se muestran en la Tabla 2. Para la optimización del rendimiento del sistema y la detección de problemas potenciales. Anexo Fig. 9.

Mediante los cálculos teóricos se obtienen los resultados de potencias activas y reactivas entregadas por los generadores y el equivalente de la carga una vez que atraviesa una distancia que es colocada como el banco de inductancias obtenemos lo mostrado en la figura 10: Anexo Fig. 10.

En la figura 11, 12 ,13, 14, se proporciona una representación gráfica que muestra la recopilación de datos variando el tiempo de muestreo, los cuales son luego contrastados con los valores teóricos calculados mediante métodos matemáticos. Anexo Fig. 11, 12, 13, 14.

La Tabla 2 contiene todos los valores que se obtuvieron a lo largo de este proceso, para una visión general. El margen de error entre cada medición es de aproximadamente el 2% en términos de precisión.

La precisión de estos resultados, donde se ha evaluado el error de cada medición, es un aspecto importante. Los resultados de la figura 15, muestran El margen de error en color rojo, lo que demuestra un nivel razonable de concordancia entre las mediciones prácticas y los valores teóricos. Varios factores de calibración y fuentes de ruido pueden ser responsables de esta pequeña diferencia, que es común en mediciones reales. Anexo Fig.15.

La prueba usada se basa en conectar una resistencia de 750 ohmios y un inductor de 0.4 uf con una carga resistiva de 400V trifásicos. Los resultados se visualizan desde la figura 11 a la 18.

El micromódulo de adquisición de datos permite la captura de datos a una escala de 1ms.

El error obtenido entre el valor teórico y el valor medido de la resistencia y la inductancia de las barras y carga no supera el 2%.

El cálculo de los valores teóricos se realizó utilizando ecuaciones propuestas por otros investigadores, lo que permitió el análisis con los valores prácticos obtenidos.

REFERENCIAS

- [1] Cuevas Bravo David, "CALIDAD DE LA ENERGIA: Disturbios Eléctricos." 2011, Ciudad Universitaria, 2011. doi: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000679406>.
- [2] A. N. Khan *et al.*, "Ensuring reliable operation of electricity grid by placement of facts devices for developing countries," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 8, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/en14082283.
- [3] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1116–1124, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.276.
- [4] "Potential Evaluation of Distributed Energy Resources with Affine Arithmetic," *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019*, no. May 2019, pp. 4334–4339, 2019, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881198.
- [5] A. S. Nair, S. Abhyankar, S. Peles, and P. Ranganathan, "Computational and numerical analysis of AC optimal power flow formulations on large-scale power grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 202, no. June 2021, p. 107594, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107594.
- [6] Y. Tu *et al.*, "Optimal Configuration of Battery Energy Storage for AC/DC Hybrid System Based on Improved Power Flow Exceeding Risk Index," *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 14, p. 3169, 2023, doi: 10.3390/electronics12143169.
- [7] A. G. Migisha, J. M. Ntayi, F. Buyinza, L. Senyonga, J. Abaliwano, and M. S. Adaramola, "Review of Concepts and Determinants of Grid Electricity Reliability," 2023, doi: 10.33.90.
- [8] Y. Lin, J. Hu, T. Wang, and Z. Wang, "Impact Mechanisms of Commutation Failure Caused by a Sending-End AC Fault and Its Recovery Speed on Transient Stability," *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, 2023, doi: 10.3390/electronics12163439.
- [9] F. Quinteros, D. Carrión, and M. Jaramillo, "Optimal Power Systems Restoration Based on Energy Quality and Stability Criteria," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062062.
- [10] M. Uzair, M. Eskandari, L. Li, and J. Zhu, "Machine Learning Based Protection Scheme for Low Voltage AC Microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3390/en15249397.
- [11] M. Bayat, M. M. Koushki, A. A. Ghadimi, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "Comprehensive enhanced Newton Raphson approach for power flow analysis in droop-controlled islanded AC microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 143, no. July, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108493.
- [12] L. F. Grisales-Noreña, J. C. Morales-Duran, S. Velez-Garcia, O. D. Montoya, and W. Gil-González, "Power flow methods used in AC distribution networks: An analysis of convergence and processing times in radial and meshed grid configurations," *Results in Engineering*, vol. 17, no. January, p. 100915, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.100915.
- [13] R. Villafuerte, R. A. Villafuerte, J. Medina, and E. Mejía, "Aplicación de un Método Iterativo de dos Pasos para el Cálculo de Flujos de Potencia," *Informacion Tecnologica*, vol. 28, no. 1, pp. 189–198, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000100019.
- [14] CELEC EP, "Sistema de transmisión a 500 kV." [Online]. Available: <https://www.celec.gov.ec/transelectric/sistema-de-transmision-a-500-kv/>

Anexos

Figura 6.
Esquema de práctica en Simulink

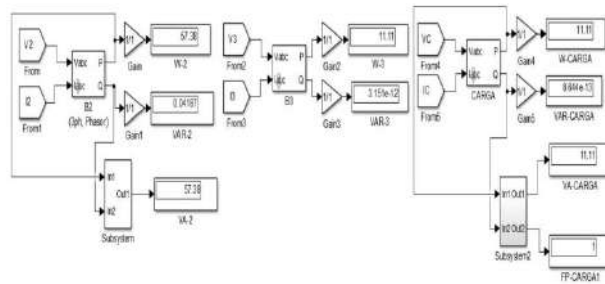


Figura 1.
Vista frontal del módulo de pruebas de circuitos eléctricos

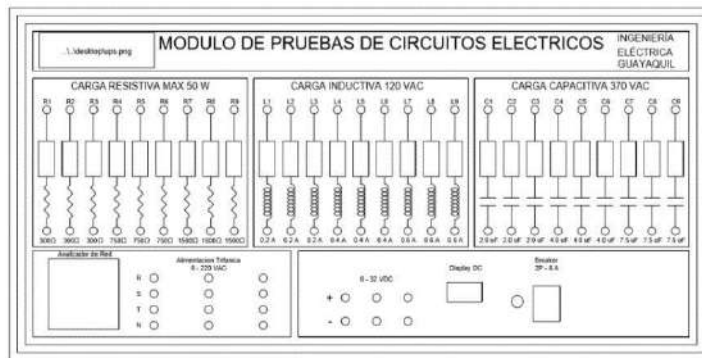


Figura 8.
Circuito para adquisición de datos de voltaje y corriente.

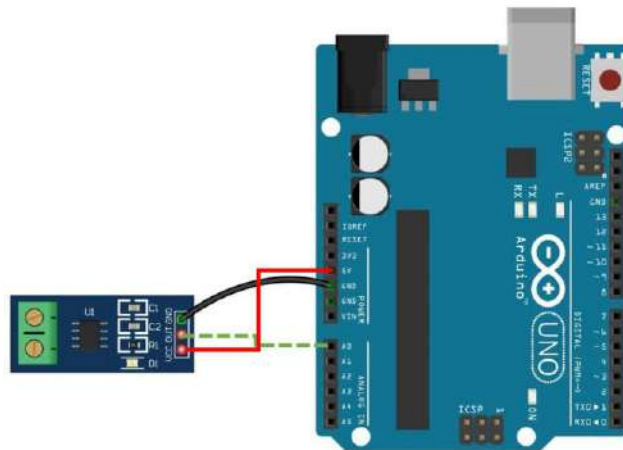


Figura 9.
Conexión de carga de flujo con 2 generadores.

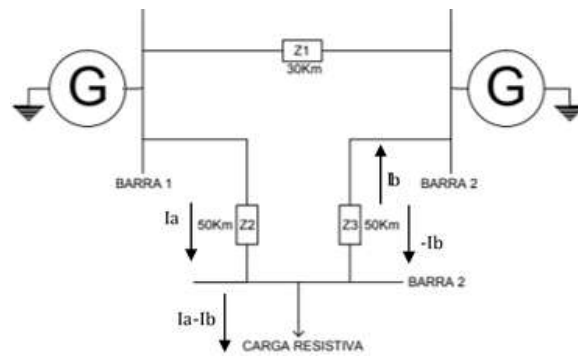


Figura 10.
Potencias activas y reactivas entregadas por los generadores.

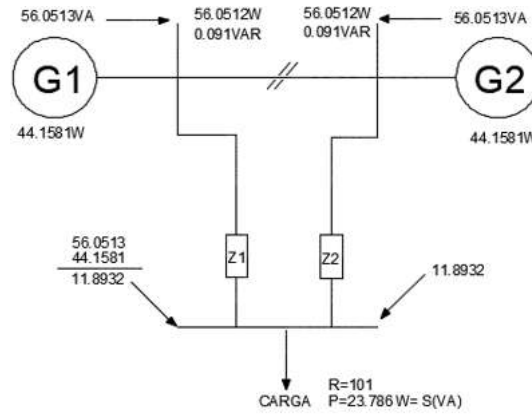


Figura 11.
Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 1 seg.

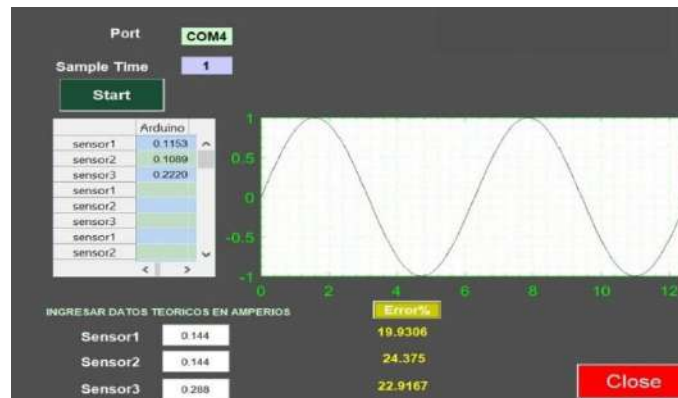


Figura 12.
Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 2 seg.

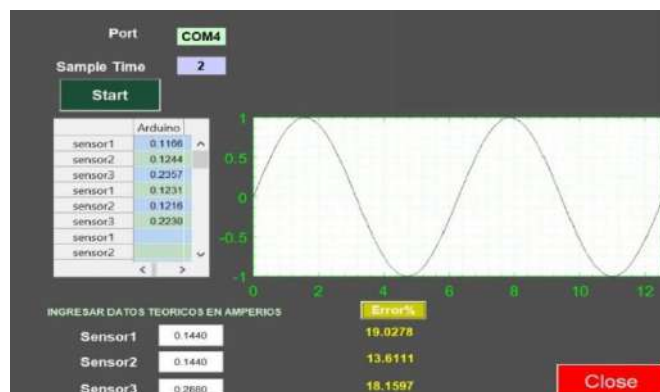


Figura 13.

Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 4 seg.

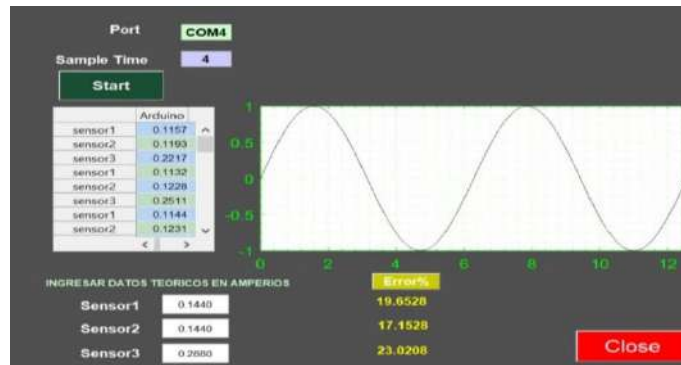


Figura 14. Adquisición de datos con tiempo de muestreo de 1 seg.

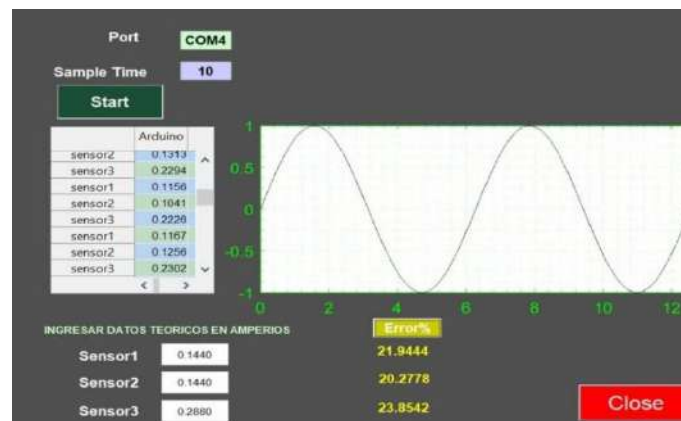
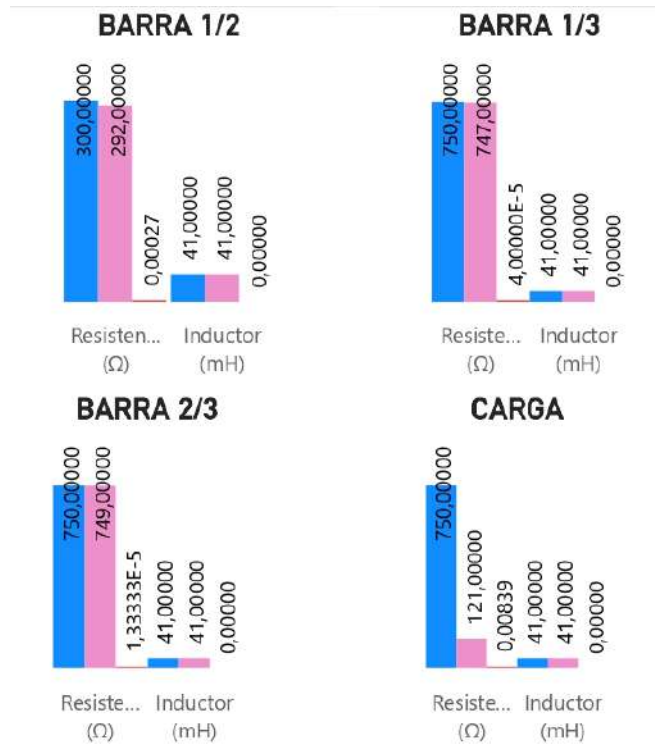


Figura 15.

Valor teórico, valor medido, error.





REVISTA INGENIO

Desarrollo de un Modelo Autónomo Para el Transporte de Jóvenes de 20 a 25 Años en la Ciudad de Ambato - Ecuador, que Utilicen el Transporte Público y/o Caminen

Development of an Autonomous Model for Transportation of Young People from 20 to 25 Years Old in Ambato - Ecuador, who use Public Transportation and/or Walk

Diana Carolina Chavez Silva [1](#) | [ID](#) Universidad Técnica de Ambato
Andrea Cristina Goyes Balladares [2](#) | [ID](#) Universidad Técnica de Ambato
Roberto Carlos Moya Jiménez [3](#) | [ID](#) Universidad Técnica de Ambato

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 21/3/2023
Recepción tras revisión: 22/5/2023
Aprobación: 21/9/2023
Publicación: 31/1/2024

PALABRAS CLAVE

Diseño industrial, Movilidad autónoma, Desarrollo tecnológico, Vehículo automatizado, Prototipo

ARTICLE HISTORY

Received: 21/3/2023
Received after revision: 22/5/2023
Approved: 21/9/2023
Accepted: 31/1/2024

KEY WORDS

Industrial design, autonomous mobility, technological development, automatized vehicle, prototype

RESUMEN

El desarrollo tecnológico del sector del transporte a lo largo de los años ha mostrado una constante evolución, permitiendo, de una manera eficiente, mejorar el desplazamiento de las personas, reduciendo los tiempos de traslado, aumentando la capacidad de usuarios, disminuyendo la emisión de gases contaminantes con la implantación de energías alternativas e innovando en el área de la tecnología con dispositivos autónomos capaces de realizar todas las operaciones necesarias para su desplazamiento. El objetivo de este documento es presentar el proceso de desarrollo de un modelo autónomo para el transporte de jóvenes de 20 a 25 años en la ciudad de Ambato/Ecuador, como alternativa a los modos de transporte público colectivo y peatonal. Para abordar este problema, se recopiló información a través de entrevistas con posibles usuarios potenciales, según el target de investigación, utilizando la metodología de startup essentials y clientogramas para definir una propuesta de valor basada en un problema identificado que correlacione, de manera formal y estética, el entorno de la ciudad. Se presenta una reflexión de los datos obtenidos de los clientes y el prototipo digital que responde a las necesidades y requerimientos de los usuarios, brindando seguridad y comodidad en los desplazamientos cotidianos, resaltando la necesidad latente en la creación de este tipo de productos.

ABSTRACT

The technological development of the transportation system over the years has shown a constant evolution allowing, in an efficient way, to improve the movement of people, reducing travel times, increasing the capacity of users, reducing the emission of polluting gases with the implementation of alternative energies, and innovating in the area of technology with autonomous devices capable of performing all the necessary operations for their displacement. The objective of this document is to present the development process of an autonomous model for the transportation of young people between 20 and 25 years old in the city of Ambato/Ecuador, as an alternative to the collective public and pedestrian modes of transportation. To address this problem, information was collected through interviews with potential users, according to the research target, using the methodology of Startup Essentials and Clientograms to define a value proposition based on an identified problem that correlates, in a formal and aesthetic way with the environment of the city. A reflection of the data obtained from the clients and the digital prototype that responds to the needs and requirements of the users, providing security and comfort in daily commuting, highlighting the latent need in the creation of this type of products is present.

1. INTRODUCCIÓN

La movilidad urbana es la principal necesidad de las ciudades pues, a partir de esta se crean desplazamientos que conectan infraestructuras en donde se realizan las actividades cotidianas que dinamizan una urbe. Para el desarrollo de los desplazamientos es necesario, en primer lugar, infraestructura de movilidad; seguido de los modos de transporte, que pueden ser motorizados y no motorizados, colectivos, masivos e individuales. El automóvil, es el protagonista de la movilidad individual, es el artefacto predilecto de los ciudadanos debido al confort que brinda, la seguridad al no tener que trasladarse a una estación para conseguir una unidad. Sin embargo, debido al motor de combustión interna genera una gran cantidad de emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y sustancias tóxicas como partículas finas y plomo, que generan efectos nocivos a la salud y al ambiente [1]. A partir de este problema, se han implementado estrategias que reúnen esfuerzos por fortalecer la movilidad sostenible priorizando a los peatones, ciclistas, artefactos o dispositivos de desplazamiento individual que funcionen como alimentadores y distribuidores de los sistemas masivos, como el metro y el tranvía [2]. Si bien esta última es la más amigable con el ambiente, no permite realizar extensos desplazamientos debido a la inseguridad, desgaste físico y variaciones climáticas.

La inseguridad en un contexto latinoamericano es latente en el campo de los estudios de transporte y movilidad, esta puede ser profundizada desde la perspectiva del transporte público y peatones, se menciona que los factores socioeconómico y espacial son de los condicionantes principales que participan en la vulneración de la seguridad de jóvenes y adultos, existe una limitante respecto al acceso a bienes, servicios, actividades y oportunidades ofrecidas en la ciudad de estudio para el grupo objetivo, los jóvenes adultos, esto incrementa el riesgo respecto al uso de transportes públicos o privados, al caminar o al hacer uso de medios alternativos como la bicicleta [3]. A este grupo de usuarios, universitarios en su mayoría, se presenta de forma generalizada para hombres y mujeres un elevado índice de atracos y acoso ya sea que estos se encuentren solos o en grupo, de esta manera se ven afectados social, económica y sobre todo personalmente.

A nivel mundial, la industria del transporte se encuentra en constante evolución debido a su potencial de automatización, y junto con el despliegue de las “Smart

Cities” se ha empezado a implementar sistemas de movilidad con transporte inteligente, de manera que se ha desarrollado vehículos que puedan funcionar sin conductor, es decir, de manera autónoma [4]. Es importante distinguir entre la automatización de vehículos y vehículos autónomos. La primera, corresponde a un artefacto automatizado, autopropulsado que, mediante hardware y software especializado, es capaz de ejercer el control dinámico de un vehículo o asistir la conducción de éste por un tiempo determinado, con la finalidad de mejorar la gestión respecto a la seguridad, la eficiencia energética y la experiencia de viaje; por otra parte, el segundo es aquel capaz de realizar todas las operaciones necesarias para la movilidad, incluyendo el control de los movimientos laterales y longitudinales, monitoreo del entorno circundante y responder a eventos no planificados y pilotar sin intervención humana [5].

Los automóviles autónomos pueden considerarse un avance tecnológico futurista, pero es importante conocer que esta evolución comenzó en 1994, cuando por las calles de París dos coches condujeron de forma autónoma por dos mil kilómetros de autopista, en este suceso se demostró que los automóviles podían realizar cambios de carril de forma autónoma y sin participación humana [6]. Por lo tanto, la movilidad autónoma hace referencia a un término que surge en el marco tecnológico de sistemas de conducción automatizados y seguros, por eso se considera un logro evolutivo en la industria automotriz. Para que una movilidad de este nivel sea una realidad se requieren diversas tecnologías avanzadas de producción y seguridad en todos los niveles de su proceso de diseño y ejecución [7]. El avance tecnológico requerido para un vehículo autónomo se relaciona de manera eficiente con la experiencia de usuario a través de aplicaciones que facilitan su funcionamiento y cumplen las etapas de su servicio, generalmente desarrollado en un contexto urbano y empresarial. Los ejes centrales de la movilidad autónoma se fundamentan en el desarrollo tecnológico, seguridad durante el traslado del usuario y la generación de estrategias de interacción entre usuario y producto.

La movilidad autónoma presente en un vehículo permite además imitar las capacidades humanas de manejo respecto a secuencia y control simultáneamente al reconocimiento de su entorno (autopistas, carriles, obstáculos), para controlar sus decisiones se apoya en una plataforma que concentra todos sus sensores eléctricos.

Actualmente empresas con innovación tecnológica han desarrollado y fabricado modelos con inteligencia artificial para ser una alternativa que solucione el tránsito vehicular y contribuya al medio ambiente. Sin embargo, esta innovación presenta problemas como carecer de reglamentación en varios países, esto incluye el territorio ecuatoriano; de igual manera, requiere una alta inversión de equipo en infraestructura tanto en su planta de producción como en un sistema vial adecuado, de este modo no es totalmente negativo ya que si se comparan los gastos de instalación de esta tecnología avanzada con los beneficios que se pueden obtener, estos últimos rebasan los primeros de manera que representa una gran mejora para el área de logística urbana [6].

En ese mismo sentido, es importante conocer las funciones operativas fundamentales de un sistema vehicular autónomo; para estimar el movimiento y dirección del vehículo se incorporan mediciones de odometría, que estima una posición relativa a su localización inicial, es bien sabido que esta proporciona una buena precisión a corto plazo, es barata de implantar, y permite tasas de muestreo muy altas, también se adicionan sensores de inercia que se respaldan principalmente por mediciones de posición global del GPS [6]. Es indispensable mantener continuamente la calibración intrínseca y extrínseca actualizándola en línea mientras opera el vehículo autónomo, la fusión de sensores se realiza en la mayoría de los sistemas actuales, especialmente cuando hay disponibles sensores complementarios como cámaras a color con buena resolución angular, sin información de distancia y dispositivos de medición de rango [8]. Con referencia a lo anterior, como requisito para los módulos de percepción de control de entorno, se necesita una correcta estimación del movimiento del vehículo y cuando este se mueve rápido o en terreno plano se produce una rotación a lo largo de los ejes longitudinal y lateral, para una buena estimación del movimiento, se incorporan todas las medidas con respecto al propio vehículo; las medidas comunes son la velocidad, la odometría, las aceleraciones, las velocidades angulares y la actitud de los sensores de inercia [9].

El objetivo principal de los sistemas de transporte autónomos es mejorar la seguridad de los usuarios en la carretera y aumentar las oportunidades de movilidad, en este sentido, se busca reducir el nivel de daño y de accidentes por completo y contribución con el medio ambiente.

En investigaciones previas se han desarrollado diversos sistemas de movilidad autónoma, [10] se propone la implementación de un sistema de navegación autónoma de anticollisiones, este vehículo es controlado a través de una placa Raspberry Pi3 Model B+ y simula su entorno a través del software MATLAB Simulink, para este modelo, se realiza un circuito limitado por líneas que evitan colisiones con obstáculos externos, para detectar su posición y posibles colisiones, el vehículo emplea una cámara que trabaja con sensores ultrasónicos conectados a una placa de Arduino Uno, es fundamental mencionar que como todo prototipo, está expuesto a un sistema caótico que puede presentar alteraciones como rectas mal captadas y trayectorias extrañas, por lo tanto, se deben realizar varias pruebas que permitan un control de todo el modelo. Otro acercamiento a sistemas autónomos [11], expone un subsistema electromecánico que trabaja de manera conjunta con un microprocesador, con esto se pretende analizar la capacidad de conocer su posición para lograr desplazarse de forma independiente desde un punto hacia otro destino seleccionado, de igual manera, para controlar un vehículo autónomo, es importante detectar mediante pruebas su capacidad para detectar y esquivar posibles obstáculos presentes a lo largo de su trayectoria con un margen de error mínimo, las pruebas que han contribuido para el correcto funcionamiento de este modelo son: Módulo GPS, brújula, sensor de ultrasonidos, motores, movilidad del vehículo, cálculo del rumbo y detección de obstáculos. Otro caso, es un vehículo autónomo impulsado por luz solar, para este modelo se combinan dos grandes campos, el de diseño y construcción, a estos se integran conocimientos de conjuntos mecánicos, eléctricos y fotovoltaicos, para cumplir los objetivos en el desarrollo de un prototipo de movilidad autónoma, se debe considerar componentes mecánicos esenciales para su correcto funcionamiento, como sistema de dirección, geometría de la dirección, suspensión, ejes de conexión, frenos, ejes de tracción, transmisión, chasis, carrocería, tren delantero y ruedas; respecto a los componentes eléctricos, se debe estudiar motores eléctricos, baterías, convertidores de potencia, sistema fotovoltaico y tecnologías auxiliares [12]. La importancia en estos proyectos radica en la multidisciplinariedad, en donde se ejecuta conocimientos de diferentes áreas técnicas y de diseño para responder a necesidades y dificultades sociales, culturales, tecnológicas y económicas presentes en las ciudades, se debe considerar al modelo como un sistema integral que requiere de controles para su funcionamiento que trabajan en conjunto con software y medios de simulación tecnológica para cumplir los objetivos planteados.

Con los avances de tecnología en la dimensión del diseño industrial, el interés en la autonomía de los dispositivos, demanda innovación en la asistencia de actividades cotidianas [13] que satisfagan las preocupaciones de una sociedad con múltiples problemas a nivel urbano, se presenta el desarrollo de una propuesta en la ciudad de Ambato en la provincia de Tungurahua, Ecuador, en donde partir de un análisis previo, general, y con la implementación de la metodología de StartUp Essentials se definió el problema de inseguridad en la movilidad en el marco de una realidad económica y social enfocada en la población estudiantil de nivel superior, jóvenes de 20 a 25 años, debido a su alta demanda de desplazamientos desde sus residencias hacia los centros educativos y el bajo poder adquisitivo para comprar un automóvil. Existen tres alternativas para el desplazamiento del público objetivo: uso de transporte público por ser menos costoso, pero se corre riesgo de ser víctima de acoso físico-verbal o de atracos; la segunda, uso de servicio privado ya sean taxis de cooperativas o unidades solicitadas por aplicaciones, pero su tarifa es elevada e incrementa aún más si se presenta un exceso de tránsito vehicular en la ciudad; y la tercera, depender de un familiar con tiempo disponible para facilitar su movilidad. Por todo lo descrito, el objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo autónomo para el transporte de jóvenes de 20 a 25 años en la ciudad de Ambato a nivel de prototipo digital enfocado solamente en el diseño del producto.

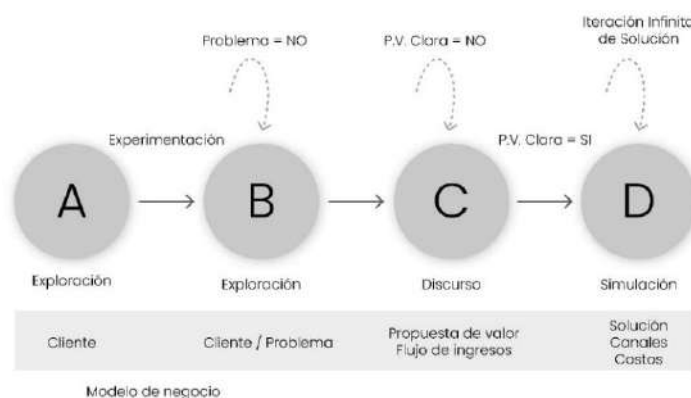
2. MÉTODO

A partir de implementación de la metodología estratégica Startup Essentials [14], que se rige por clientogramas con etapas de desarrollo definidas (A, B, C, D), como se observa en la Figura 1, se levantan datos de las experiencias y validaciones de clientes reales que se convertirán en futuros usuarios, con un ciclo de experimentación continua. Se ha partido de observaciones que han permitido construir y experimentar para lograr medir y analizar los datos obtenidos para determinar si es correcto perseverar, o se está a tiempo de pivotar para lograr resultados favorecedores que impulsen una idea innovadora en el medio actual. Para iniciar la construcción de la propuesta, en el primer clientograma se ha formulado un cliente y problema hipotético de acuerdo con lo antes mencionado, con una métrica meta y otra resultante, consignada a partir de entrevistas realizadas de manera virtual y en ciertos casos de manera presencial,

con preguntas filtro realizadas a público que esté en el margen del usuario objetivo, con esto es posible abordar un primer aprendizaje con clientes. En la misma fase de exploración se encuentra el clientograma B, para el cual el proceso se basó en indagaciones previas para la reformulación de la hipótesis y así nuevamente se obtuvo un aprendizaje exitoso de nuevos posibles clientes entrevistados. Es importante mencionar que para la realización de las entrevistas se formularon preguntas previamente, considerando que se necesite saber y qué elementos y experiencias serían de ayuda para construir una solución y un concepto futuro.

Figura 1

Adaptación Formato clientogramas. Recreación de Startup Essentials (2016)



La construcción de herramientas previas al clientograma C, como son el mapa de empatía, mapa de usuario y rueda de emociones han logrado una valoración ideal respecto al usuario, de esta manera el proyecto ha profundizado al conocer cómo piensan y sienten, qué observan y escuchan los usuarios, para así analizar sus esfuerzos y resultados ante el problema planteado. En ese mismo sentido, se divide en etapas las situaciones relacionadas a la movilidad de estudiantes universitarios y su proceso durante la jornada diaria, de esto se especificaron los actores y acciones realizadas junto con la experiencia que estas impregnan en el día a día del usuario. Es evidente entonces la presencia de elementos visibles e invisibles que engloban la movilidad en jóvenes adultos que serán expuestas posteriormente; así se culmina esta parte de la metodología con el clientograma C, como se puede observar en la Figura 2, en este ya se expone un antiproyecto basado en la generación de propuestas de movilidad autónoma, en esta parte se obtuvieron divisas a partir de entrevistas con clientes, así como un aprendizaje positivo.

Figura 2

Adaptación Formato clientogramas. Recreación de Startup Essentials (2016)



Realizadas las consideraciones anteriores, el proceso se ha complementado con el seguimiento de las ID cards, estas otorgan un nombre con su respectiva descripción que especifica cómo ha de realizarse cada representación de diseño organizadas en cuatro categorías, bocetos, dibujos, modelos y prototipos [7]. Respecto a los bocetos, esta herramienta parte de un boceto de idea hasta un boceto informativo, se puede presenciar la externalización de pensamientos como punto inicial y concluir en una codificación y comunicación de manera rápida y efectiva a través de gráficos de apoyo para un resultado representativo, posterior a lo mencionado se realizan representaciones digitales del producto y dibujos de detalle hasta lograr una ilustración técnica que comunique detalles técnicos realistas y así conocer los componentes del futuro producto que será manufacturado.

Como tercera parte, se encuentran los modelos que favorecen al diseñador para evaluar características de la forma, visualizar la relación entre componentes del sistema, así como los principios operacionales fundamentales y el factor ergonómico para comunicar de manera óptima el producto de diseño mediante la representación física precisa de la apariencia del mismo; el modelo de igual manera permite evaluar las herramientas requeridas para su ensamble y el ajuste adecuado para los componentes y demostrar cómo se procederá con su mantenimiento [7]. En la categoría de prototipos se explora desde un experimental hasta concluir en el prototipo de preproducción, en esta transición se modelan con precisión los componentes y se emulan los materiales de producción; su utilidad radica en la evaluación de cambios en el diseño para optimizar su desempeño combinando así la funcionalidad y apariencia del producto para su fabricación a gran escala.

Finalmente la metodología empleada en el proyecto culmina con el clientograma D, de esta manera busca finalizar con la venta del producto final o la firma de compromiso por parte del cliente para su posterior venta y

entrega; con un discurso previo de la propuesta de valor junto con el prototipo de preproducción se logra una simulación que muestra la solución a la que se ha llegado, se reafirma el cliente, problema y solución hipotética, al igual que los antes mencionados, se traza una métrica meta y resultante, a través de una conversación con clientes potenciales es posible obtener nuevamente divisas y como parte del aprendizaje se obtienen canales, egresos y flujo de ingresos.

Tipologías existentes

Para el siguiente análisis se seleccionaron dos referentes del mercado internacional, el primero fue el i-Road de Toyota, competencia directa por las característica que presenta como dirección en una sola rueda, vehículo eléctrico con una velocidad máxima de 60km/h, y como principal es su estructura en tres ruedas, a nivel formal y funcional presenta un excelente desempeño en un entorno urbano facilitando la movilidad de jóvenes y adultos, soportando hasta 140 kg con un tiempo de recarga máximo de 3 horas, respecto a su cromática se ha considerado como aporte al proyecto, los otorgados a materiales metalizados monocromáticos. Sin embargo, una de las desventajas que presenta es que se requiere previa práctica y documentación para su uso y así evitar accidentes.

El segundo referente que se considera es el Twizy de Renault, que de igual manera es una competencia directa en el mercado internacional, este se comercializa tanto en sitios oficiales y en concesionarias a nivel mundial. Entre sus características se destacan, el ser un vehículo de cuatro ruedas, con un tipo de transmisión de 4x2, igualmente es un cuadriciclo eléctrico con una velocidad máxima de 80km/h con un motor eléctrico de 13 kW, sus desventajas son el elevado costo para usuarios como estudiantes y la incomodidad para dos personas, por la posición en la que estos deberán moverse. Dentro de la ciudad en un contexto urbano permite desplazarse de manera cómoda y por sus dimensiones facilita el encontrar espacios disponibles para su estacionamiento.

En el contexto ecuatoriano, el Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT) de la Universidad Politécnica Salesiana ha desarrollado el primer vehículo autónomo fabricado en América Latina, ANTA es un proyecto investigativo que trabajo con tecnología de vanguardia mediante el uso de inteligencia artificial y algoritmos, de manera que es posible garantizar una conducción segura y eficiente, este proyecto

multidisciplinario fusiona conocimiento de ingeniería automotriz, computación y electrónica, todos bajo un marco de identidad ecuatoriana a través de la investigación e innovación tecnológica; el objetivo de este vehículo es reducir el impacto ambiental generado por los medios de transporte convencionales, esto logrado por medio de la implementación de sistemas de propulsión eléctrica, automatización y optimización de energía, a la par el equipo de investigación busca generar soluciones para la movilidad de personas con discapacidad, para así complementarse en un sistema con tecnología en seguridad y control de conducción para garantizar la seguridad de los usuarios durante el transporte [8].

Conceptualización

De manera preliminar al proceso de diseño, se construye el concepto en base a las directrices mostradas en la Tabla 1, como primer punto se ha definido nuevamente el usuario, como personas de 20 a 25 años estudiantes universitarios de preferencia; como estrategias se han agregado el análisis de referentes y la simulación de su entorno, para esto se consideraron modelos clásicos o vintage y vehículos modernos, la similitud que radica entre estos es la facilidad de uso, funcionalidad y el presentar una forma compacta, además se ha considerado referentes arquitectónicos como edificios e iglesias en los que predomina un contraste entre formas lineales y curvas, así se los ha valorado para la conceptualización del

producto y de esta manera lograr que este se entrelace con el entorno urbano de la ciudad.

De lo antes mencionado se han analizado las formas que presentan, la funcionalidad y relación con el arquetipo de vehículo de tres ruedas, así como la posibilidad de pensar en una utopía de ciudad inteligente para a futuro lograr un cambio de la realidad presente. En la tercera fase de este modelo se presentan los requerimientos y respecto a las demandas del proyecto se ha evaluado su importancia en orden descendente comenzando con la seguridad, funcionalidad, ergonomía y culminando en la percepción-estética; para seleccionar los criterios se los ha analizado en categorías respecto a su forma, cromática, los posibles materiales a considerar en su proceso de fabricación, así como su estructura, mecanismo y el valor agregado que aportará en su servicio, de esta manera se aborda la última fase, la evaluación de criterios, en la misma que se han validado los criterios analizados previamente para así definir el concepto, el cual se resume en *high tech*, describiéndolo como un tricar autónomo inspirado en morfologías vintage y contemporáneas de transporte compartido, para sintetizar lo estético - formal - funcional del pasado con el presente enfocado hacia el futuro de Ambato como una *Smart City* considerando su entorno y formas presente en ella para adaptarlo como un nuevo sistema de transporte, autónoma y segura.

Tabla 1
Conceptualización del Producto

	Fase	Directriz	Planteamiento
1	Definición de usuario	Definir el género y edad de los posibles futuros usuarios	Género Edad Ocupación
2	Estrategias	Definir las estrategias aplicadas para el desarrollo del concepto	Referentes Entorno
3	Requerimientos	Definir los requerimientos y demandas del proyecto	Producto Seguridad Funcionalidad Ergonomía Percepción- Estética
4	Selección de criterios	Seleccionar los aspectos formales, tecnológicos, funcionales y materiales en los cuáles se basará el proyecto	Forma Cromática Materiales Estructura Mecanismo Servicio

5	Evaluación de criterios	Evaluar y validar los criterios seleccionados	Forma Cromática Materiales Estructura Mecanismo Servicio
---	-------------------------	---	---

6 Definición del concepto

Nota: La tabla muestra un modelo de las directrices a considerar en cada fase de la construcción del concepto del producto de diseño con su respectivo planteamiento.

Brief creativo

Como parte de los procesos de diseño, en la fase crítica analítica se ha realizado el brief creativo para guiar el desarrollo del proyecto y su futuro seguimiento. En esta etapa es fundamental describir al producto como un tricar, un medio de transporte autónomo, seguro, funcional y accesible para usuarios de 20 a 25 años de la ciudad de Ambato, así se responde a los objetivos planteados; el investigar las necesidades de los jóvenes estudiantes respecto a la movilidad y posibles expectativas para una vida de calidad sin efectos negativos como estrés o tensiones causadas por el flujo de tránsito en la ciudad o por la inseguridad como realidad actual, generar soluciones viables considerando el contexto del usuario y sus actividades diarias; así como desarrollar un producto que favorezca a este sector poblacional optimizando recursos como tiempo y dinero al movilizarse de un punto a otro en la ciudad de Ambato de manera segura y eficiente.

Por lo tanto, el mensaje que el proyecto quiere comunicar se enfoca en una autonomía total inspirada en morfologías vintage y contemporáneas para generar un medio transporte compartido, para sintetizar lo estético - formal - funcional del pasado con el presente enfocado hacia el futuro de Ambato como una Smart City considerando su entorno y formas presente en ella para adaptarlo como una nueva forma de transporte, autónoma y segura, con esto se aporta a la construcción de una solución para el problema que contempla la falta o reemplazo de medios de transporte obsoletos respecto a la movilidad para estudiantes universitarios en la ciudad, la creciente inseguridad y movilidad accesible para todos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Acercamiento con futuros clientes

Con la implementación de la metodología antes mencionada, al final de cada clientograma se produjo una retroalimentación donde se obtuvieron aprendizajes en base a las realidades cotidianas del público objetivo

entrevistado (clientes). Como punto de partida se obtuvieron las experiencias de los clientes, reflejadas en el clientograma A, entre ellas se destacan, la inseguridad que presenta al movilizarse en ciertos sectores de la ciudad, la necesidad de economizar en transporte, irregularidad de horarios fijos entre cada unidad lo que genera tensiones causadas por el estrés durante el tiempo de espera, en el mismo sentido, el clientograma B arrojó resultados sobre experiencias negativas en los usuarios, temor debido a experiencias previas como robos y acoso tanto físico como verbal, en las entrevistas realizadas se presentaron ventajas que aportan a la realización del proyecto, como la necesidad de un transporte compartido pero para un número reducido de usuarios, de manera específica mujeres entrevistadas presentaron sus inconvenientes por la falta de un transporte seguro para ellas.

En el mapa de empatía realizado se sostuvo un acercamiento con estudiantes universitarios, y se conoció más de cerca sus pensamientos, el acoso en transporte público

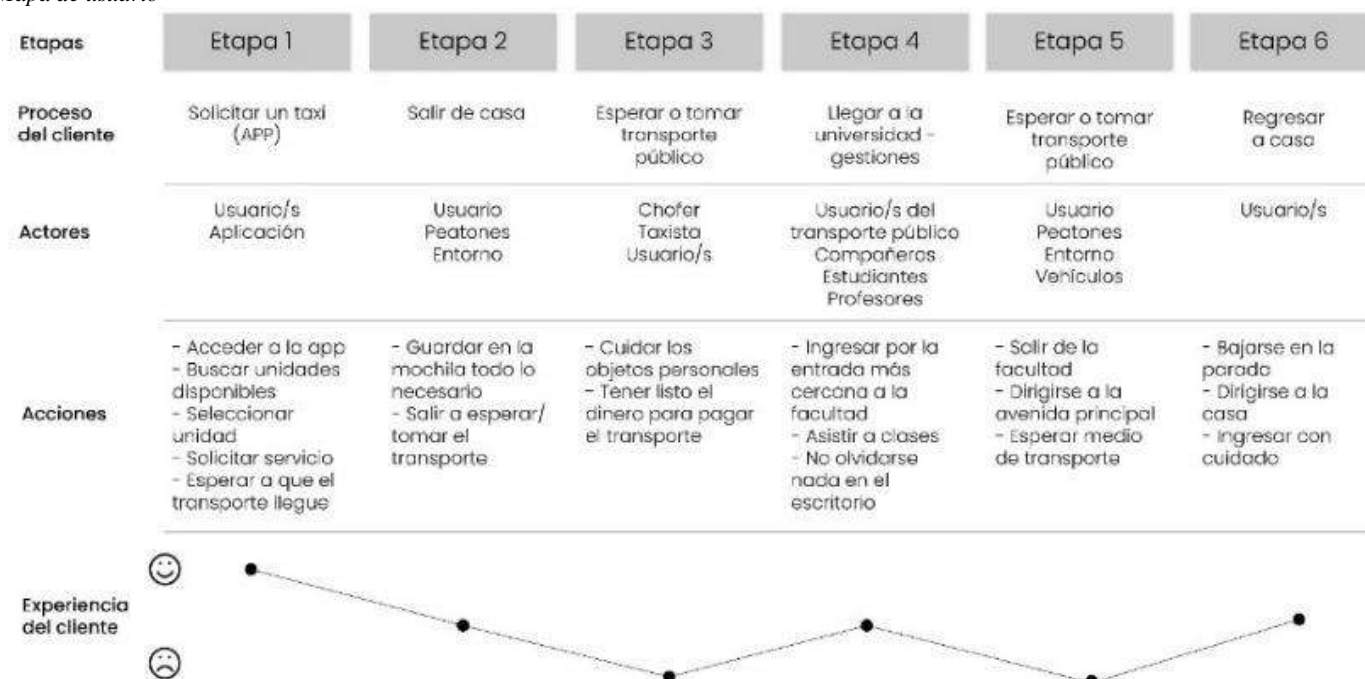
se ha normalizado y nadie actúa ante ello, falta de conocimiento de las rutas, en especial estudiantes que no conocen completamente la ciudad por lo tanto se desconoce las rutas implementadas para llegar a su destino, y cuando se encuentran ante peligro no siempre es posible compartir su ubicación. La realidad actual de la ciudad respecto a la inseguridad y la falta de organización en el sistema público de transporte ha generado desconfianza en los jóvenes estudiantes respecto a sus pertenencias.

Respecto al mapa de usuario realizado, en las diferentes etapas propuestas respecto a las actividades del usuario entorno a la movilidad se ha determinado quienes son los actores, entre ellos están los estudiantes universitarios, peatones, los choferes de transporte público y privado y el entorno que rodea toda la situación planteada en el proyecto. Las experiencias demostradas en las entrevistas han sido tanto negativas como positivas, entre las

experiencias neutras destacan las que envuelven a los estudiantes con el público general en un mismo entorno. En esta etapa también se encuentran elementos invisibles, respecto al uso de aplicaciones, no existe una garantía respecto al perfil del conductor de la unidad, la

inseguridad en las paradas de bus y falta de información respecto a las posibles rutas por las cual dirigirse, todo esto se puede evidenciar Figura 3.

Figura 3.
Mapa de usuario



Para el clientograma C, se obtuvo una métrica resultante de 10 clientes entrevistados con divisas obtenidas que corresponden a números telefónicos y correos electrónicos; el aprendizaje extraído permite conocer la necesidad de invertir en nuevos sistemas de transporte con medios alternativos eléctricos y una oportunidad para el transporte compartido con rutas claras y horarios predeterminados para una mejor gestión vial en el casco urbano de la ciudad.

Como último punto de la metodología aplicada, se presenta el clientograma D, para esto el cliente, problema, y solución hipotética se han mantenido de la misma manera en el proyecto se ha propuesto obtener una divisa la misma que corresponde a un compromiso de compra futura mediante un acuerdo con la empresa pública a través de una dignidad representante del GAD municipalidad de la ciudad, esto también representa la métrica resultante. En esta conversación con el futuro cliente el equipo de trabajo ha presentado la propuesta, así como sus beneficios de implementarlo para mejorar y optimizar el servicio de transporte y movilidad en la zona urbana de la ciudad con una solución a la problemática

planteada de manera innovadora para el crecimiento y desarrollo de esta.

Requerimientos del usuario

A continuación, se exponen los requerimientos de futuros clientes, esta información forma parte de los resultados recolectados a partir de las entrevistas filtro realizadas. En la tercera fase posterior a la selección de estrategias para el desarrollo del proyecto, se definieron los requerimientos y demandas presentes en el grupo objetivo; el primero y más importante a considerar es la seguridad, de esta manera se ha propuesto un concepto amigable para brindar comodidad a los usuarios, esto de manera tangible e intangible. Como segundo punto, se encuentra la funcionalidad, es indispensable aportar a los usuarios con un servicio de transporte con un sistema óptimo que sustituya de manera correcta el actual sistema de movilidad de la ciudad, conjuntamente el factor ergonómico es importante para cubrir lo antes mencionado, con medidas adecuadas correspondiente a la media de la población de estudio.

De manera complementaria, se ha analizado la factibilidad de implementar al producto una aplicación de descarga gratuita para crear un mejor sistema servicio-producto que brinde una experiencia de usuario completa, con acciones concretas para un transporte seguro y eficaz a la orden de los estudiantes universitarios, esta aplicación ha sido propuesta para ser amigable y de fácil uso sin costos o adelantos adicionales, constituye el valor agregado de la propuesta de diseño para contribuir a la movilidad en el casco urbano de la ciudad.

Requerimientos del producto

Formales

De acuerdo con la construcción del concepto, con el análisis previo de referentes y preferencias del usuario, como un requerimiento formal encontramos a la simplicidad de la estructura, con una variante geometrizada, sin llevarla al extremo de lo orgánico y paramétrico, así se lo piensa más como un transporte seguro y funcional y no como una estructura diseñada desde el ego del equipo de trabajo. Con lo expresado, la forma considerada en el producto para movilidad urbana consiste en un cuadrilátero irregular, para una estructura minimalista funcional, con bordes suavizados para no perder el carácter de amigable y comunicarse de manera correcta con el usuario, además se propone optimizar en recursos de fabricación sin estructuras complejas que eleven su costo en el mercado.

Estéticos

La percepción-estética que se ha representado se enfoca en un estilo minimalista-futurista, se prioriza un servicio seguro ante la estética como requerimiento principal. Respecto a su cromática se ha seleccionado una paleta de neutros y colores oscuros con materiales con un índice de refracción ideal para comunicar la autonomía de su sistema con tecnología avanzada, en su interior se acondicionarán materiales monocromáticos para evitar una saturación en el ambiente.

Materiales

Materiales resistentes han sido considerados para la solución propuesta, como el uso de fibra de vidrio para la carrocería, conocido como un material ligero y que se adapta al diseño, además se contribuirá a la producción local gracias a que en la ciudad se cuenta con varios talleres que trabajan con este material; también consta de aluminio para la estructura interna, y plástico resistente como polietileno de alta densidad para el asiento y

revestimiento interno, esto realizado mediante proceso de inyección.

Tecnológicos

El prototipo de diseño está desarrollado para tener una batería de níquel-hidruro metálico con capacidad de 90 Kw y un motor con potencia de 120 CV, su tiempo de vida útil del batería estimado será variable de hasta 3000 y 5000 ciclos de carga completos, este vehículo de funcionamiento autónomo posee sistemas de guía y visión computarizada que le permite tomar decisiones de acuerdo con su entorno y obstáculos presentes en el mismo. El concepto de producto cuenta con puntos de recarga de batería en los centros comerciales de la ciudad y en entidades públicas o empresas privadas aliadas al proyecto. El sistema automatizado está diseñado con tecnología avanzada en inteligencia artificial para ser completamente autónomo sin intervención de las capacidades humanas. Entre los componentes se encuentran el motor eléctrico, sistema eléctrico inteligente con activación de acciones por medio de sensores, sistema de asistencia mecánica automatizada, batería recargable, sistema de climatización y audio y un escáner de códigos para pago rápido, siendo un servicio *contact less*. También con neumáticos que disminuyen la rodadura para de esta manera garantizar un mayor rendimiento cuando circule por superficies mojadas y secas.

Figura 4

Motor de vehículo eléctrico-autónomo



Proceso de diseño

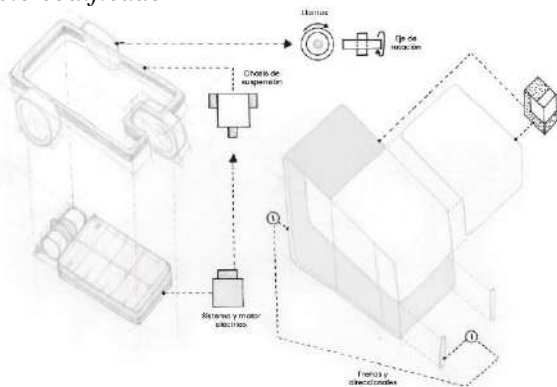
Proceso de bocetaje

Como primera intención de diseño a través del boceto de idea o servilleta se externalizaron los pensamientos considerados de acuerdo con referentes y tipologías analizadas, para el boceto referencial se profundiza en su posible apariencia, con alternativas y observaciones para futura aplicación en el producto de diseño. Para la

aplicación del método ID cards se emplea un boceto de memoria, en el cual se expanden pensamientos para fortalecer el proceso de diseño mediante mapas mentales. En la figura 6 (Anexo Fig.6) se muestra un esquema simplificado para demostrar el principio subyacente, mediante la categorización de la información, finalmente en la etapa prescriptiva se explora los detalles técnicos como mecanismos, manufactura, materiales y dimensiones, de manera representativa para comunicar de mejor manera el concepto.

Figura 5

Boceto codificado



Render de vistas

Anexo Fig.6

Dimensiones generales

Anexo Fig.7

Planos de dibujo

Anexo Fig.8

Modelo

En base a los referentes y lo aprendido por parte de los clientes gracias a las entrevistas se optó por una apariencia minimalista y elegante tanto para el vehículo Kaeri como para su app complementaria, así se ha construido una plataforma, un sistema producto-servicio que permita interacciones intuitivas y amigables con el usuario y su entorno. Con la implementación de un sistema eléctrico en el vehículos se cuida el medio ambiente debido a que se disminuyen las emisiones causadas por gases de efecto invernadero, desde su producción, además, no causa contaminación auditiva, requieren de poco mantenimiento y con el asistente de ayuda la seguridad del usuario siempre será prioridad, ya que, los vehículos eléctricos

reducen el centro de gravedad aportando al auto una mayor estabilidad con menos posibilidades de volcamientos y así soportar mucho más un choque lateral. (Anexo Fig. 9)

Sistema

Para el modelo se ha realizado de acuerdo al método de ID cards, de esta manera se ha explorado y visualizado los componentes principales, en este caso, una simulación básica del sistema eléctrico y la movilidad basada en tres ejes, con la dirección en la llanta delantera y la fuerza de empuje en sus llantas traseras así se mantiene estable en su centro de gravedad, soportando el mayor peso en el asiento donde se ubicaran los usuarios, y el mismo se compensará de mejor manera al contar con un usuario en silla de ruedas. (Anexo Fig. 10)

Prototipo Pre-producción

En el prototipo final se ha representado de mejor manera los materiales a emplear mediante simulación de estos, con todos sus componentes, producido en escala para su respectiva valoración y así dar paso a su fabricación en serie, con una presentación detallada del producto conceptualizado culmina la realización del proyecto expuesto. (Anexo Fig.11)

Integración con aplicación Kaeri App

Para complementar el servicio y experiencia de usuario relacionada con el producto, se ha realizado un prototipo de aplicación disponible en varias plataformas de descarga gratuita, proporciona un servicio inmediato de movilidad autónoma a los usuarios que los soliciten, en la aplicación es posible conocer quién será el acompañante en su ruta, los usuarios de Kaeri tendrán acceso a crearse un perfil que puede ser público o privado para otros estudiantes universitarios. Además, cuenta con *Mi Kaeri Wallet*, este punto ofrece una billetera electrónica para un servicio contact less, en el cual los usuarios pueden ir acumulando sus devoluciones o recargar su servicio desde cincuenta centavos en adelante, así no tienen que preocuparse de por sí se presenta un gasto de última hora en la universidad o en su camino a casa. Para mayor seguridad el usuario puede enviar su ubicación a sus contactos destinados sin costo adicional, de igual manera puede seleccionar su ruta de preferencia de acuerdo con lo disponible en su billetera. La aplicación es amigable con todo tipo de smartphone al ser un sistema multi plataforma. Kaeri está en constante actualización, además de contar con el soporte de Google maps para conocer la ubicación satelital, para ser mucho

más precisa en las rutas que se puedan elegir, teniendo en cuenta el tránsito en tiempo real; al brindar todas estas posibilidades, hace que el ecosistema en el cual funciona tenga una relación directa con la experiencia del usuario, para de esta manera generar la experiencia óptima y así lograr captar muchos más usuarios que sean partícipes de esta experiencia de movilidad. Una aplicación ideal para los estudiantes, con varios beneficios, pero gratuita pensada en sus posibilidades y necesidades entorno a un transporte seguro, compartido y amigable. (Anexo Fig. 12)

4. CONCLUSIONES

La estrategia de Startup Essentials ha permitido un desarrollo eficaz del proyecto, ha contribuido a conocer la manera correcta de cómo encontrar clientes, plantear y delimitar el problema, además, ha permitido aclarar y tener presente las necesidades de usuarios, así a través de un acercamiento con clientes ha sido posible experimentar propuestas de valor mediante la creación de modelos y prototipos, esto en relación con un seguimiento favorable de las ID cards las cuales aportaron al entendimiento y construcción de los requerimientos reales de posibles usuarios para generar propuestas y mejorarlas mediante la realización de bocetos, modelos y prototipos [7] para lograr una cercanía con la venta del producto y una previa experimentación con su precio, de esta manera el equipo de trabajo ha culminado el proyecto con una solución a la cual se denominó Kaeri, un transporte autónomo que impulsa la independencia de los estudiantes universitarios, el grupo objetivo sobre el cual se ha trabajado.

REFERENCIAS

[1] G. Osorio y R. Viganò, "Propuesta de solución bimodal al problema de contaminación vehicular urbana", *Ingeniería e Investigación*, vol. 27, pp. 143-148, diciembre 2007.

[2] Goyes-Balladares, A. C., & Moya-Jiménez, R. C, "Aprovechamiento y presentación de potencialidades sostenibles en el modelo de movilidad urbana del centro de la ciudad de Ambato", *Hábitat Sustentable*, vol. 12, no. 2, pp.66–83, diciembre 2022.

[3] L.P. Pereyra, A. Gutiérrez y M.M Nerome, "La inseguridad en el transporte público del Área Metropolitana de Buenos Aires. Experiencias y percepciones de mujeres y varones", *Territorios*, vol. 39, pp. 71-95, diciembre 2018.

[4] E. Ruiz Ranz, "La ciudad inteligente y su impacto en la vida urbana: Los nuevos sistemas de movilidad que reestructurarán el urbanismo del S.XIX. El coche

De manera utópica en relación a la realidad social, económica y cultural de la ciudad de estudio se ha construido el producto, dentro de un contexto real con experiencias compartidas que se han valorado, misma que han sido recolectadas como aprendizajes a través de entrevistas filtro con futuros clientes, el análisis efectuado con referentes clásicos y contemporáneos en cuanto a morfologías, estética y funcionalidad junto con referentes arquitectónicos de la zona urbana y con el análisis detallado de tipologías existentes y competencia directa, han sido procesos que contribuyeron a la construcción de un concepto sólido en el mismo que prima la seguridad sobre todo, de esta manera se llegó a una morfología simplificada con una geometría de cuadrilátero irregular, de esta manera se ha enfocado en cumplir su objetivo principal, movilidad urbana autónoma y segura, a nivel formal y estético se relaciona con el entorno físico de la ciudad.

Mientras que el futuro apunta hacia el transporte autónomo y sostenible, se ha mostrado la necesidad del desarrollo multidisciplinario que integre el servicio, la experiencia del usuario y la seguridad, aportando a la creación de nuevas plazas de trabajo dentro de las ramas tecnológicas, económicas y socioculturales. El del vehículo autónomo presentado para movilidad urbana multimodal invita a la empresa pública, privada y gobiernos autónomos a invertir en propuestas de innovación que fortalezcan el desarrollo urbanístico, social, ambiental y económico de la ciudad.

autónomo", tesis fin de grado, Urbanística y Ordenación del Territorio, UPM, Madrid, España, 2018.

[5] R. Campos Canales y G. Pérez, "Tecnología y recambio energético en el transporte automotor de América Latina y el Caribe", *FAL CEPAL*, vol. 8, pp. 6-8, 2018.

[6] Y. Li, M. Díaz, S. Morantes y Y. Dorati, " Vehículos autónomos: Innovación en la logística urbana", *Iniciación Científica*, vol. 4, pp. 34-39, 2018.

[7] F. Golbabaie, T. Yigitcanlar y J. Bunker (2020). The role of shared autonomous vehicle systems in delivering smart urban mobility: A systematic review of the literature, *International Journal of Sustainable Transportation*. [Online]. DOI:10.1080/15568318.2020.1798571

[8] Grupo de Investigación de Ingeniería del Transporte (GIIT). (2023). UPS presenta proyecto de

- investigación ANTA, primer vehículo autónomo de Latinoamérica en el sector educativo. [Online]. UPS, Cuenca, Ecuador. Disponible en: <https://www.ups.edu.ec/noticias?articleId=1713908&byid>
- [9] J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J.Z. Kolter, D. Langer, O. Pink, V.R. Pratt, M. Sokolsky, G. Stanek, D.M Stavens, A. Teichman, M. Werling y S. Thrun, "Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms", Intelligent Vehicles Symposium, pp. 163-168, ISBN: 978-1-4577-0890-9, 2011.
- [10] M. Schweitzer, A. Unterholzner, and H.-J. Wuensche, "Real-time visual odometry for ground moving robots using GPUs, in Proc. Int. Conf. Comput. Vis. Theory Appl.", pp. 20–27, 2010.
- [11] L. Prior Sancho, "Diseño e implementación de un sistema de control con mecanismo anti-colisiones para un vehículo autónomo", tesis fin de grado, Electrónica Industrial y Automática, UPC, Barcelona, España, 2022.
- [12] E. García, "Diseño de un prototipo de vehículo autónomo", tesis fin de grado, Sistemas de Telecomunicación, UPM.
- [13] E. Carreño, E. Vacca y I. Lugo. (2012). Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. *Tecnura*. [Online]. DOI: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2012.2. a08
- [14] Moya Jiménez, R., Magal Royo, T., Flores, M., Caiza, M., "Design and validation of an exoskeleton for hand rehabilitation in adult patients with rheumatoid arthritis", *SmartTech-IC 2021: Proceedings of the Second International Conference on Smart Technologies, Systems and Applications*, diciembre 2021.
- [15] U. Sarabia, Medium. (2016). (A. S. Essentials, Productor). [Online]. Disponible en: <https://medium.com/clientesfelices>

Anexo

Fig. 6

Vistas (*superior, perspectiva, lateral, frontal*)

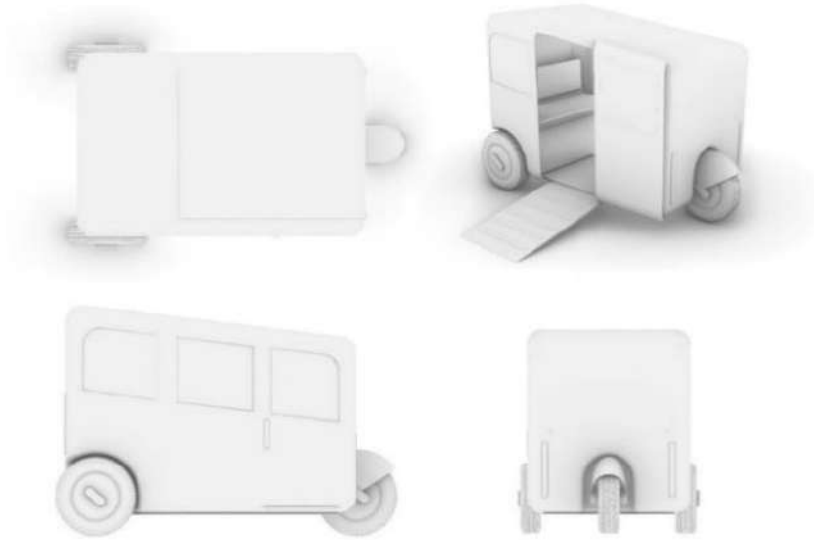


Figura 7

Dimensiones generales

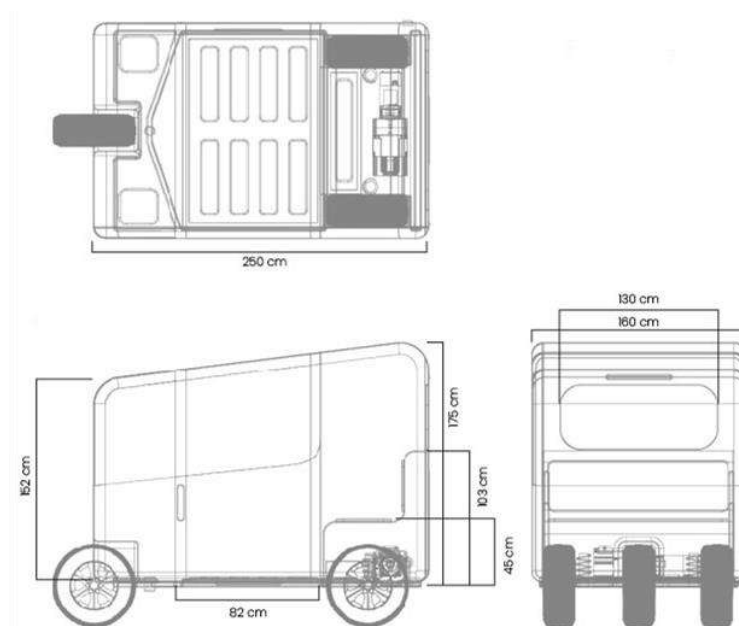
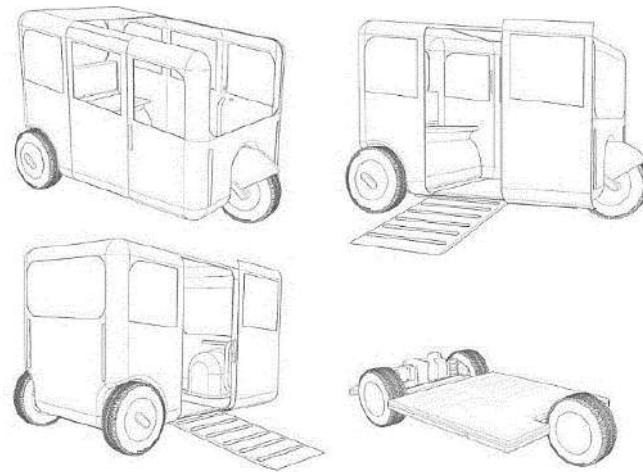


Figura 8
Dibujo de perspectivas



Elaboración propia 2021

Figura 9
Modelos básicos e impresión 3D de prueba



Figura 10
Modelo de sistema

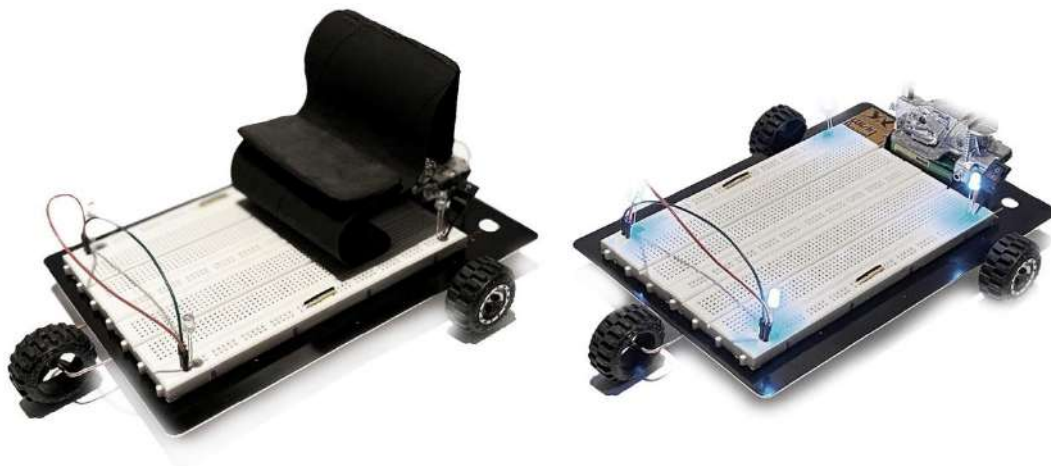


Fig 11

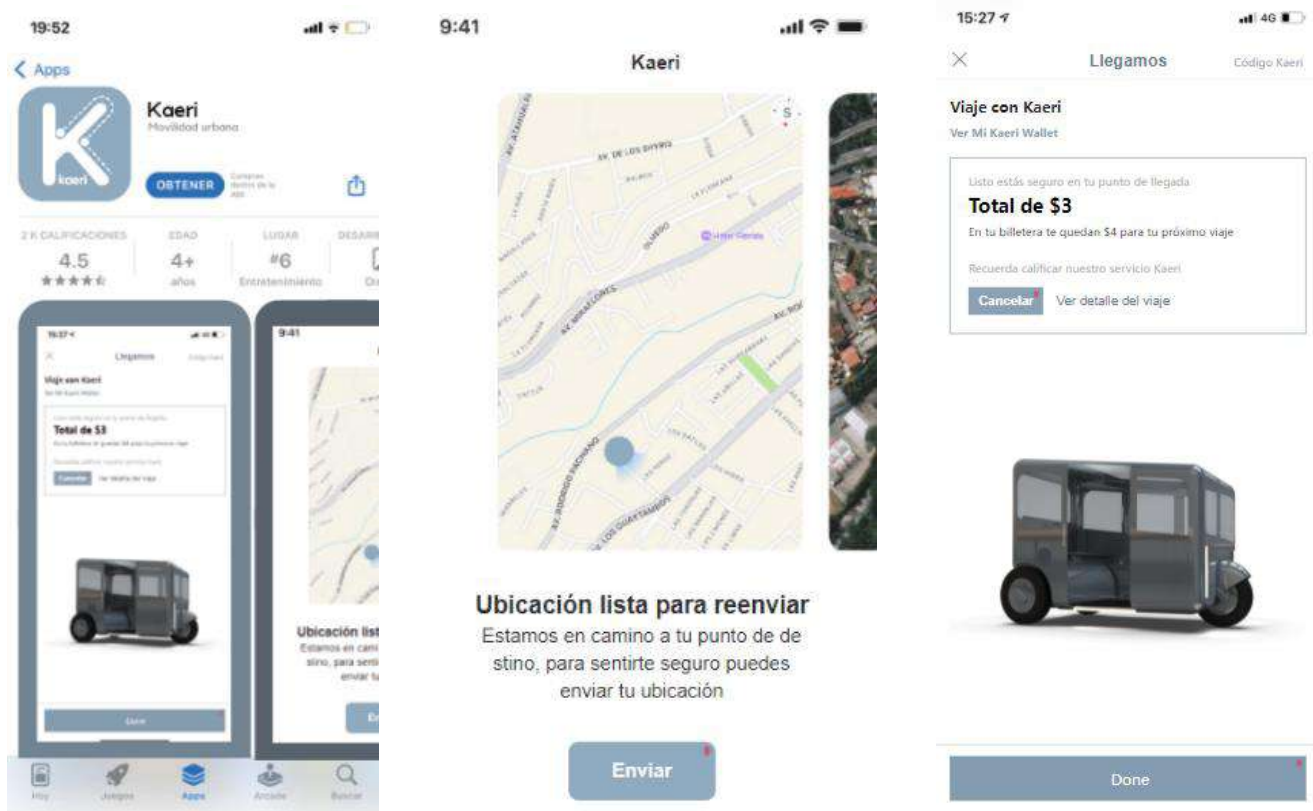
Modelo digital de sistema



Elaboración propia 2021

Figura 12

Mockup Kaeri App





Evaluación del Modelo Estructural de Casas Construidas con Fardos de Paja y Mochetas de Madera en la Región Andina Central del Ecuador

Structural Model Evaluation of Houses Built with Straw Bales and Wooden Piers in the Central Andean Region of Ecuador

Pablo Enrique Caiza Sánchez [1](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí (Ecuador)

Luisa Paulina Viera Arroba [2](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador, Quito (Ecuador)

Marcos Andrés García Peñaloza [3](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí (Ecuador)

HISTORIA DE ARTÍCULO

Recepción: 28/09/2023
Recepción tras revisión: 23/10/2023
Aprobación: 20/11/2023
Publicación: 31/01/2024

PALABRAS CLAVE

evaluación de modelos estructurales, materiales no convencionales, tableros de virutas orientadas, fardos de paja

ARTICLE HISTORY

Received: 28/09/2023
Received after revision: 23/10/2023
Approved: 20/11/2023
Accepted: 31/01/2024

KEY WORDS

Evaluation of structural models, unconventional materials, oriented strand boards, straw bales

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología para la evaluación de los modelos estructurales de residencias construidas usando fardos de paja, pero reforzadas con mochetas de madera. Se usa como ejemplo una casa construida en la ciudad de Sangolquí, en la región andina central del Ecuador. Este tipo de edificación tiene una serie de características únicas debido a los materiales empleados, a las virtudes y defectos de la mano de obra y a las limitaciones impuestas por presupuestos restringidos. Los resultados obtenidos en los modelos analíticos se validaron al compararlos con los determinados experimentalmente usando sensores y dispositivos de adquisición de datos. Se obtuvo una diferencia máxima del 6.4% en los periodos de vibración estructural.

ABSTRACT

This paper presents a methodology for the evaluation of the structural models of residences built using straw bales but reinforced with wooden piers. A house built in the city of Sangolquí, in the central Andean region of Ecuador, is used as an example. This type of building has a series of unique characteristics due to the materials used, the strengths and weaknesses of the workmanship, and the limitations imposed by restricted budgets. The results obtained in the analytical models were validated by comparing them with those determined experimentally using sensors and data acquisition devices. A maximum difference of 6.4% was obtained in the structural vibration periods.

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador la agricultura es una de las principales fuentes de ingresos para la población rural, donde la cosecha y siembra de trigo es una de las actividades de explotación de recursos naturales que más se practica, sobre todo en la región Sierra [1]. Según [2], las provincias con mayor producción de trigo en el país son Pichincha e Imbabura con 9140 ha y 8980 ha, respectivamente. El residuo de esta actividad es propiamente la paja, la cual representa cerca del 50% de todo el material que se cultiva. Por lo general, con una mínima parte de este material se realizan fardos prismáticos, que facilitan su acopio y que posteriormente serán destinados para alimentación de ganado. La mayor parte, sin embargo, simplemente se quema.

En [3], se indica que todo este material puede ser reutilizado para la construcción de viviendas con bajo impacto ambiental ya que de cada 4 toneladas de fardos de paja se pueden construir cerca de 100 viviendas artesanales. Al combinar el uso de fardos de paja con materiales de bajo costo e impacto ambiental como la madera, barro, arcilla, cal, se pueden obtener viviendas funcionales y técnicamente desarrolladas [4].

La síntesis de estos materiales se ve reflejada en casas con un sistema constructivo de fardos de paja recubiertos con barro y estructura en base a mochetas de madera [5]. Las construcciones con fardos de paja y madera, como elemento resistente, son una buena alternativa de bio-

construcción sostenible, e incluso se conoce de algunas estructuras construidas hace más de un siglo que aún se mantienen en pie; países como Francia, Canadá, Inglaterra, Austria, Dinamarca, Australia, han llevado a cabo este tipo de estructuras y su impacto ambiental cada vez es más bajo [6].

Dentro de estas estructuras, los fardos de paja cumplen la función de aislamiento acústico y térmico, pero, con la ayuda del revoque de barro, son capaces de resistir cargas verticales, mientras que el sistema resistente para cargas sísmicas lo componen las mochetas y otros elementos como las cerchas de madera [7].

Existe un diverso número de materiales alrededor del mundo, pero materiales tradicionales como el hormigón y acero, que además generan un alto impacto ambiental desde su elaboración hasta la puesta en obra, no se pueden implementar en todos los lugares, fundamentalmente por motivos económicos. Es por eso por lo que, para aprovechar las plantaciones circundantes de la parte rural de la Sierra ecuatoriana, se propone analizar estructuras realizadas con materiales no convencionales como la paja y la madera [8].

Actualmente, en Ecuador se encuentran diversas estructuras de este tipo, pero la que se usa como ejemplo en el presente estudio se encuentra implantada en la provincia de Pichincha, sector Sangolquí. Esta investigación consiste en la validación analítica en base a programas especializados de modelación de los resultados de vibración ambiental realizada in situ. Todo esto con la finalidad de establecer un tipo de modelación que permita mejorar el diseño al momento de realizar nuevas viviendas de este tipo.

En un primer paso, se ha caracterizado el material de recubrimiento de las mochetas de madera para determinar

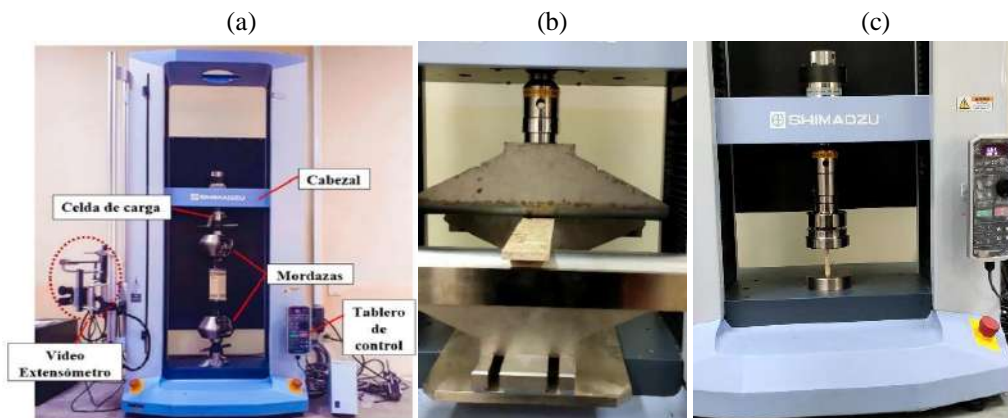
sus características físico-mecánicas e ingresar esos valores en la modelación. Esto ha sido necesario por la falta de información como elemento estructural de las propiedades de los tableros de virutas orientadas, también conocidos como tableros OSB por su nombre en inglés (Oriented Strand Board). Luego, se ha creado el modelo estructural en base a la estructura aporticada, pero incluyendo los paneles OSB modelados con elementos finitos y el material de relleno que es la paja. De igual manera que para los paneles OSB, las características de los fardos de paja se alcanzan de los resultados experimentales, en este caso del estudio realizado por [9], para obtener resultados lo más cercanos a la realidad. Debe notarse que se desarrollaron varios modelos analíticos, con los que se concluyó que, la opción relativamente más precisa y con menor tiempo de ejecución en el software, es la aporticada con secciones equivalentes. Esta conclusión se obtuvo al comparar los resultados analíticos con los experimentales.

2. MÉTODO

En este estudio se investigaron, en un primer paso, las propiedades de los tableros OSB mediante los ensayos a tracción flexión, compresión, contenido de humedad y peso específico, para cada ensayo se realizaron probetas con dimensiones expuestas en la norma American Standard Test Method (ASTM) para materiales a base de madera. En el ensayo de flexión se usaron 14 muestras de dimensiones 500x50x9.5mm; para el de tracción, 14 de 410x25x9.5, con disminución de sección de acuerdo a la norma; para el de compresión, 16 de 60x25x9.5mm. Se utilizó una máquina de ensayos universales AGS-X Shimadzu (UTM) de 50 KN, ver Fig. 1.

Figura 1

(a) Máquina Universal de ensayos AGS-X Shimadzu, (b) ensayo a flexión y (c) ensayo a compresión



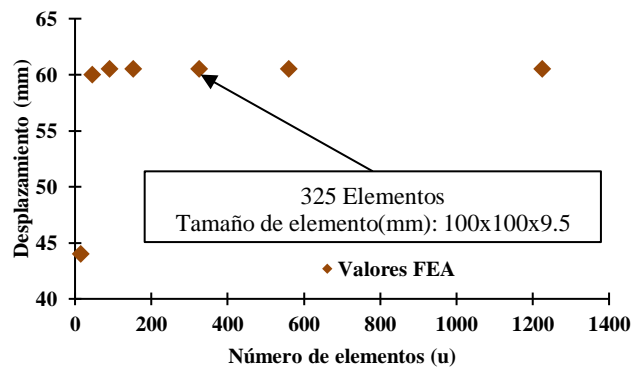
En un segundo paso, se estudiaron las propiedades de pandeo de los tableros de dimensiones comerciales de

1220x2440 mm, mediante el uso de un software comercial con la capacidad de realizar un modelo de elementos finitos (FEM), de elementos tipo placa rectangulares de 8 nudos, de comportamiento elástico lineal. Se asignaron apoyos fijos en la parte inferior y/o corta del tablero y se restringió el desplazamiento en sentido paralelo al espesor del tablero. De los ensayos se usaron los siguientes valores: para el módulo de elasticidad a compresión, 1499,8 Mpa (valor promedio), para el coeficiente de poisson 0,3 y, para el peso específico 60 N/m³. La carga fue de compresión, aplicada como puntual en cada nudo del borde corto en la parte superior del modelo del panel, representando por tanto una carga distribuida. En el modelo, el análisis incluía la formación de una curva de pandeo con valor máximo al centro de la altura del panel. Para la modelación numérica se escogió un mallado de dimensiones entre 500x500mm y 50x50mm. En efecto, se apreció que, a partir de un mallado de 200x200mm, se obtienen resultados similares por lo que se optó por trabajar con un mallado de 100x100mm, porque genera resultados confiables y el tiempo de procesamiento es relativamente bajo (ver Tabla 1 y Figura 2).

Tabla 1
Comportamiento de elementos finitos

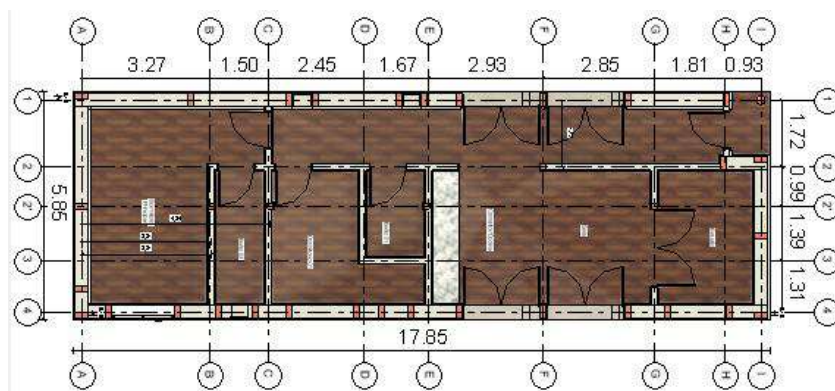
Dimensión de elementos (mm)	Número de elementos (u)	Desplazamiento (mm)
500x500	15	44
300x300	45	60
200x200	91	60.5
150x150	153	60.5
100x100	325	60.5
75x75	561	60.5
50x50	1225	60.5

Figura 2
Curva de convergencia de elementos finitos



En un tercer paso, esencial, se buscó determinar el comportamiento modal de una estructura construida a base de fardos de paja y mochetas compuestas de tableros OSB y madera sólida. La geometría de la estructura es la indicada en [10], cuenta con una sola planta de forma rectangular con 5.85m de ancho y 17.85m de largo, y la cubierta es a dos aguas con una altura máxima de 5.00m. Esta edificación será destinada a vivienda, (ver Figura 3). Debe notarse que el lado corto se identifica con el eje de referencia “Y”.

Figura 3
Dimensiones en planta de la estructura para el modelo de análisis modal



Esta estructura está compuesta por muros de fardos de paja de 35x48x150cm, columnas de 15x15cm de madera sólida

y tipo mochetas, cubierta conformadas de vigas de 70x150mm, 70x140mm y puntales de 70x110mm.

Las cargas que considerar son las expuestas en la norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 [11] y [12].

Se considera que el sistema resistente es mixto debido a la presencia de pórticos de madera y de muros de paja, se espera, por tanto, modos de vibración experimental diferentes al medirlos sobre las columnas y los muros. Las masas que se usaron en el análisis vibracional provenían de la masa propia de los elementos considerados en el modelo (pórticos, muros y cubierta), pero también se incluyó, con fines de comparación, la sobrecarga aplicada sobre la cubierta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente, se presentan los resultados de los diferentes ensayos para caracterizar los tableros OSB

Figura 4

Curva Fuerza vs Desplazamiento a Flexión

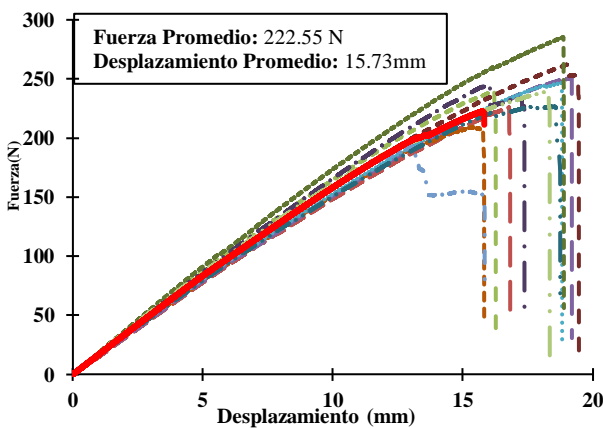
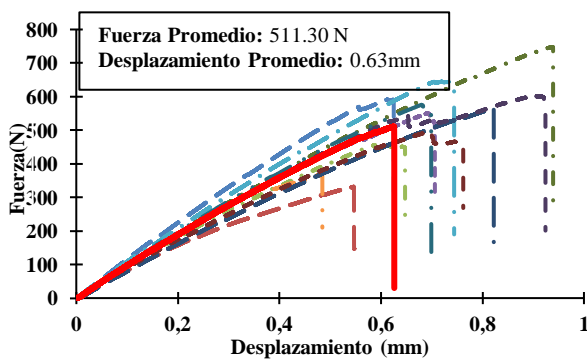


Figura 5

Curva Fuerza vs Desplazamiento a Tracción



Modo mecánico de flexión

En la Figura 4 se presentan las curvas Fuerza versus Desplazamiento de cada muestra en línea punteada, mientras que en línea continua de color rojo la curva promedio, de donde se tiene una fuerza a flexión promedio de 222.55 N.

Modo mecánico a tracción

En la Figura 5 se presentan las curvas fuerza versus desplazamiento para cada muestra en línea punteada, mientras que en una línea continua de color rojo la curva promedio, de donde se tiene una fuerza promedio a compresión de 4117.05N. Anexo Fig. 6 y Fig. 7.

Modo mecánico a compresión

En el modo mecánico a compresión se identificó que para las 16 muestras ensayadas la fuerza mínima de falla es de 2663.86N mientras que la máxima fuerza es de 4700.11N, se grafica la curva fuerza versus desplazamiento de cada muestra en línea punteada y la curva promedio en línea continua de color rojo, además se tiene una fuerza promedio a compresión de 4117.05N. Anexo Fig. 6 y Fig. 7.

Se presenta la curva esfuerzo versus deformación unitaria para determinar el módulo de elasticidad a compresión (MOE_C) del material (ver Figura 7).

En la Figura 7 se aprecia un esfuerzo a compresión de 16.67 N/mm² y una deformación unitaria de 0.013mm/mm y un MOE_C promedio de 1499.8Mpa o 15297.70kg/cm².

Modo mecánico de corte

En la Figura 8 se presentan las curvas fuerza desplazamiento para cada muestra donde se aprecia un rango de fuerza a corte entre 8167.75N y 13630.90N. Anexo Fig. 8.

Carga crítica a pandeo

Para determinar la carga crítica a pandeo en los tableros OSB, se procedió a ingresar los valores de peso específico, el módulo de elasticidad a compresión (MOE_C) y el coeficiente de poisson obtenidos de los ensayos de laboratorio y ya indicados previamente. También, se configuró la geometría del modelo para el análisis de un tablero comercial. Anexo Fig. 9.

En la Figura 9 se indica el modelo con un mallado de 100x100mm y al que se asignó una carga distribuida de 250

kg/m, Con estos datos se tiene un desplazamiento en sentido paralelo al espesor del material máximo de 60.5mm en el centro del tablero y un factor de 1.00514 para calcular la carga crítica a pandeo, con estos resultados se calcula la carga crítica a pandeo.

$$Q_{cr} = 17.86 * 14 * 1.00514 \quad (1)$$

$$Q_{cr} = 251.3 \text{ kg/m} \quad (2)$$

Una vez realizada las operaciones se determinó que el tablero OSB de dimensiones 1220x2440x9.5mm tiene la capacidad de resistir una carga crítica a pandeo de 251.3kg/m.

Análisis modal de una estructura con fardos de paja y

Tabla 2

Resultados del análisis modal de la estructura de fardos de paja (Software comercial)

Modo (u)	Periodo (s)	UX (%)	UY (%)	SumUX (%)	SumUY (%)	RZ (%)	SumRZ (%)
1	0.188	0.00%	54.30%	0.00%	54.30%	0.14%	0.14%
2	0.149	36.20%	0.00%	36.20%	54.30%	43.20%	43.30%
3	0.133	33.90%	0.41%	70.10%	54.70%	32.50%	75.80%
4	0.128	11.10%	1.30%	81.10%	56.00%	5.10%	80.90%
5	0.115	0.05%	26.20%	81.20%	82.20%	0.09%	81.00%
6	0.114	1.30%	2.30%	82.50%	84.50%	1.10%	82.00%
7	0.108	0.07%	0.07%	82.60%	84.60%	0.79%	82.80%
8	0.107	0.00%	0.05%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
9	0.107	0.00%	0.03%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
10	0.106	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
11	0.099	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%
12	0.099	0.00%	0.00%	82.60%	84.60%	0.00%	82.80%

En la Tabla 2 se identifica que el modo número 1 es el modo fundamental de la estructura debido a que en este modo se presenta la mayor participación de masa en el sentido “Y” (paralelo al lado corto de la planta rectangular de la edificación) con un 54.30%, y un período fundamental de 0.188s. El modo número 2 es, en cambio, el modo fundamental para el sentido “X” con un 36.20 % y un periodo de 0.149 s.

En la Figura 10 se presenta la vista en planta y una visualización 3D del comportamiento modal en el sentido “Y” con un 54.30% de masa participativa. Anexo Fig.

mochetas con tablero OSB

En este análisis se busca encontrar los modos de vibrar representativos del comportamiento estructural de la edificación, a partir del porcentaje de masa que interviene en ellos. Se encuentra que hay modos que por sí solos contribuyen con más del 20% de la masa de la edificación. Al estudiar sus formas vibratorias se determina que en ellos intervienen conjuntamente tanto los pórticos como los muros. Posteriormente, el estudio se concentra en validar su existencia e importancia al comparar los resultados analíticos con los experimentales.

Análisis modal mediante el uso del software comercial

Para este modelo, al igual que en el descrito en la Figura 9, se utilizó las propiedades obtenidas de los ensayos de laboratorio y valores expuestos en la norma [12], en la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis modal de la estructura utilizando el software comercial.

10.

En la Figura 11 se aprecia una vista en planta y una visualización 3D del comportamiento modal en el sentido “X”, con un 36.20% de masa participativa. Anexo Fig. 11. Debe recalarse que estos modos de vibrar incluían el movimiento conjunto de pórticos y muros, es decir que no existió un comportamiento independiente de los pórticos y muros.

Análisis modal mediante el uso del software SeismoStruct

Para la validación adicional de los resultados obtenidos con el software comercial se presenta las respuestas del software SeismoStruct (ver Tabla 3).

Tabla 3

Resultados del análisis modal de la estructura de fardos de paja (Software SeismoStruct)

Modo	Período	Ux	Uy	Uz	Rx	Ry	Rz
1	0.177	0.00%	39.82%	0.00%	1.44%	0.00%	0.08%
2	0.148	56.93%	39.82%	0.00%	1.45%	2.18%	24.56%
3	0.129	80.11%	39.85%	0.00%	1.45%	3.97%	86.57%
4	0.124	80.98%	43.66%	0.00%	1.45%	3.98%	86.62%
5	0.116	83.35%	44.66%	0.00%	1.48%	4.04%	87.72%
6	0.113	84.37%	47.85%	0.00%	1.49%	4.46%	88.04%
7	0.104	84.39%	84.26%	0.00%	1.56%	4.52%	89.58%
8	0.092	84.40%	90.74%	0.00%	1.57%	4.53%	90.01%
9	0.082	84.40%	90.74%	0.00%	1.57%	4.53%	90.83%
10	0.072	85.00%	91.30%	0.01%	1.72%	5.45%	91.20%

Análisis modal experimental

En el estudio realizado por [10], se determina la vibración ambiental mediante la utilización de un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) y 4 sensores A, B, C y D, los mismos que se ubican en distintos lugares como se aprecia en la Figura 12. Anexo Fig. 12.

Los sensores A y C se ubicaron en columnas de madera sólida mientras que los sensores B y D se ubicaron en mochetas. La ubicación de estos sensores está pensada para obtener no sólo datos traslacionales sino también datos de desplazamientos rotacionales de la estructura. Se puede apreciar también el dispositivo de adquisición de datos, DAQ, donde se registran las aceleraciones de la estructura.

Se realiza el procesamiento de los datos registrados y se determinan 3 modos de vibración, cada uno con su respectivo período y frecuencia. En la Tabla 4 se aprecian estos valores.

Tabla 4

Periodos y frecuencias de vibración

	Modo 1	Modo 2	Modo 3
Frecuencia	5.698	6.785	7.942
Periodo	0.176	0.147	0.126

En la Tabla 4 se indica que el modo 1 es el modo fundamental de la estructura con un periodo de $T=0.176$ s. Al comparar el período obtenido en campo con el periodo de la modelación se tiene un 1.70% de diferencia entre estos dos resultados, con lo que se concluye que el periodo

reportado en la modelación está dentro de un rango aceptable.

Con los resultados del análisis de la vivienda elaborada con fardos de paja y columnas tipo mochetas se determinó lo siguiente:

Influencia de los paneles OSB en el comportamiento de la estructura

Se presentan los resultados tomando en cuenta las propiedades propias de los paneles OSB y los resultados del modelo donde se asumen propiedades nulas. Anexo Fig. 12.

En la Figura 13, se identifica que los paneles OSB proveen una mayor rigidez a la estructura, con un 17% de diferencia entre los períodos de cada modelo. Se concluye que los tableros OSB sí aportan rigidez a los fardos de paja. Anexo Fig. 13.

Análisis del comportamiento de las secciones equivalentes utilizadas un software adicional: SeismoStruct

Las columnas tipo mochetas se conforman por dos tipos de secciones y de dos materiales por lo que para el software SeismoStruct, ocupado para la validación de los resultados del software comercial, se trabajó con dos secciones equivalentes, en la Figura 14 se presentan las dos secciones utilizadas. Anexo Fig. 14.

La sección equivalente "a", es una sección rectangular hueca de $150 \times 350 \times 18.5$ mm y el material utilizado es el

OSB, el cual tiene las propiedades más desfavorables de los dos materiales. A su vez, la sección equivalente “b” es una sección compuesta por dos secciones: un canal tipo C y una placa adicional. En esta se utilizaron los dos tipos de materiales. En la Tabla 6 se presentan los resultados del análisis de las dos secciones.

Tabla 5
Resultados del análisis modal de la sección equivalente 1 y 2

Modo	Sección Equivalente 1				Sección Equivalente 2			
	Período	Ux	Uy	Rz	Período	Ux	Uy	Rz
1	0.177	0.00%	39.82%	0.08%	0.163	0.00%	24.95%	0.01%
2	0.148	56.93%	39.82%	24.56%	0.122	0.01%	26.03%	0.06%
3	0.129	80.11%	39.85%	86.57%	0.104	56.87%	26.03%	3.45%
4	0.124	80.98%	43.66%	86.62%	0.091	57.00%	40.64%	3.52%
5	0.116	83.35%	44.66%	87.72%	0.090	57.83%	42.39%	63.99%

En la Tabla 5 se aprecia que la estructura es mucho más rígida al utilizar la sección equivalente 2, pero en cambio se tiene un menor porcentaje de participación modal en las tres direcciones; Por otro lado, el periodo de la sección equivalente 1 es mucho mayor que el de la sección 2, pero, tiene un mayor porcentaje de masa participativa.

Al analizar las dos secciones equivalentes, tanto en período como en masas participativas, se optó por trabajar con la sección equivalente 1 porque cuenta con un comportamiento estructural acorde con los resultados experimentales.

Análisis modal de los modelos creados

En la Figura 15 se presentan los 3 primeros períodos de cada modelo, y a la vez, los períodos del análisis experimental. Anexo Fig. 15.

Al analizar el comportamiento de cada modelo se nota que, en éstos, cuando se asigna una carga temporal se tiene una diferencia del 7.9% entre cada período fundamental. A su vez, para los modelos donde se toma en cuenta solo carga permanente, se tiene una diferencia del 5.03%. Se puede concluir que el modelo numérico realizado es válido debido a que no existe una variación significativa en los resultados que reporta cada software.

Una vez validada la modelación numérica, se puede identificar en la Figura 15 que los modelos que tienen una mayor similitud con el análisis experimental son los que toman en cuenta únicamente la carga permanente de la estructura.

Una vez validada la modelación computacional, en la Figura 16 se presenta el comportamiento de los modelos que sólo consideran el peso propio y el análisis experimental. Anexo Fig. 16.

De la Figura 16 se puede concluir que, en efecto, el análisis de vibración ambiental experimental genera resultados a partir de las cargas actuantes en el momento del estudio, por lo que el análisis se debe realizar usando la carga permanente de la estructura. Por esta razón, se procede a realizar la comparación únicamente con los resultados de los modelos donde se toma en cuenta el peso propio de los elementos estructurales.

Obsérvese que el periodo fundamental que reporta el software SeismoStruct tiene un porcentaje de 0.10% de diferencia con el periodo del análisis experimental, mientras que la diferencia con el software comercial es del 6.38%.

Si bien el software SeismoStruct tiene un periodo similar al determinado en el análisis experimental, el comportamiento en periodos que reporta el software comercial tiene una mayor similitud con el comportamiento reportado en el análisis experimental.

Finalmente, es importante resaltar que las diferencias entre los resultados en los modelos analíticos y los experimentales están dentro de un rango que se considera aceptable en la práctica diaria de la ingeniería civil. Por tanto, el diseño a partir de los modelos desarrollados asegura resultados confiables en términos de seguridad estructural.

4. CONCLUSIONES

La carga crítica a pandeo determinada mediante la modelación computacional tiene una diferencia del 59% con respecto a la carga a compresión promedio determinada de los ensayos de laboratorio, esta variación se da en razón de que el programa permite realizar un modelo ideal mientras que en el laboratorio se puede tener muestras

irregulares lo que no permite realizar una compresión pura, o a su vez generar desplazamiento lateral, lo que provoca variación en los resultados.

Los modelos computacionales de la estructura tomando en cuenta solo pesos propios tienen un 6.81% de diferencia en periodos con respecto al análisis experimental, mientras que los modelos donde se asigna una sobre carga en la cubierta tienen una diferencia del 186%, con lo que se concluye que los modelos computacionales donde se considera solo pesos propios tienen una mayor similitud con respecto al análisis experimental realizada in situ.

La modelación realizada en el software comercial genera periodos similares tanto en valor como en comportamiento a los determinados a través de un análisis experimental realiza in situ con respecto a periodos.

Al realizar el modelamiento de la estructura sin tomar en cuenta la participación de los paneles OSB, se concluye que la influencia de estos tableros es la de proveer de una mayor rigidez a la estructura lo que se traduce en un aporte significativo a la rigidez de los fardos de paja.

Las casas elaboradas con fardos de paja y columnas tipo mochetas pueden ser una alternativa confiable de construcción para viviendas unifamiliares además que permiten generar un ahorro significativo al utilizar materiales propios de las zonas andinas.

Se ha desarrollado un proceso de validación de los resultados experimentales que incluyen la incorporación como elementos estructurales de los fardos de paja y los tableros OSB. Para las secciones de las mochetas se recomienda usar una sección hueca equivalente. Las cargas deben estudiarse inicialmente sólo considerando el peso propio, con el fin de facilitar su comparación con resultados experimentales de vibración.

Se usan dos programas de análisis estructural que muestran que, si bien los primeros modos son similares, los superiores no. Se puede recomendar, por tanto, crear configuraciones regulares tanto en planta como en elevación que disminuyan la importancia de estos modos superiores de vibración.

REFERENCIAS

- [1] S. Caguana, «Análisis de la transformación del sistema agrario en el territorio del Hatun Cañar, Ecuador,» Universitat Jaume, Valencia, 2018.
- [2] MAGAP, «Sistema de información pública agropecuaria. Boletín Situacional. Trigo, Ecuador,» Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito, 2017.
- [3] V. Ponce, «Análisis de eficiencia energética de muro con fardo de paja y revoque de tierra cruda,» Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2017.
- [4] Viera, «Factibilidad de construcción de viviendas sismo resistente en la zona andina del Ecuador utilizando fardos de paja,» vol. 1, n° 269, 2020.
- [5] J. Mardones y I. Jofré, «Construcción con fardos de paja: Una solución sustentable para la Finca Ecológica Prema Mandal,» Universidad Técnica Federico Santa María, Concepción, 2018.
- [6] Viera, Paulina; Aguirre, Dario; Monzo, J, «Determinación de las Características del fardo de paja de trigo como desecho agroindustrial para su aprovechamiento como material de construcción,» 2020.
- [7] C. Martínez, «Estudio y aplicaciones de las construcciones con fardos de paja beneficios de los materiales naturales,» Universidad de Valladolid, Valladolid, 2019.
- [8] J. Reyes, «Diseño arquitectónico de un conjunto residencial sustentable en la ciudad de Loja,» Universidd Internacional del Ecuador Loja, Loja, 2017.
- [9] J. Pachala y H. Rosero, «Sistema constructivo de casas unifamiliares con muros de paja portantes,» Universidad Central del Ecuador, Quito, 2016.
- [10] P. Viera, «Estudio de vibración ambiental de una casa hecha con fardos de paja en la región Andina de Ecuador,» Quito, 2022.
- [11] NEC Cargas no Sísmicas, «Cargas no Sísmicas,» Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Quito, 2015.
- [12] NEC Estructuras de Madera, «Estructuras de Madera,» Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, Quito, 2015.

Figura 6
Curva Fuerza-Desplazamiento a Compresión

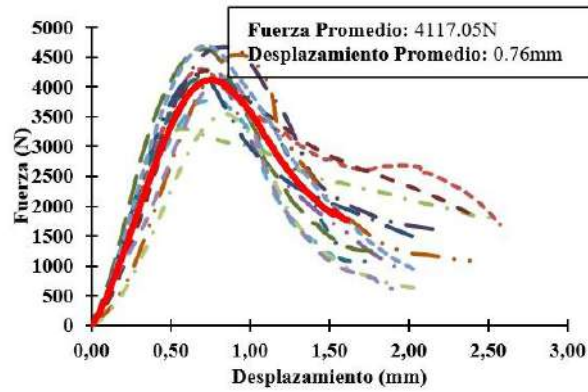


Figura 7
Curva Esfuerzo-Deformación unitaria

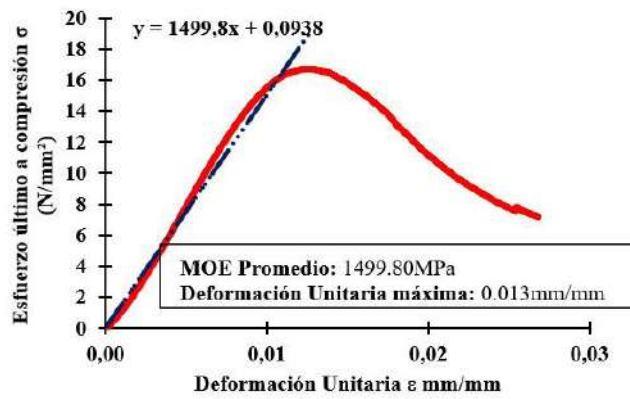


Figura 8
Curva Fuerza vs Desplazamiento a Corte

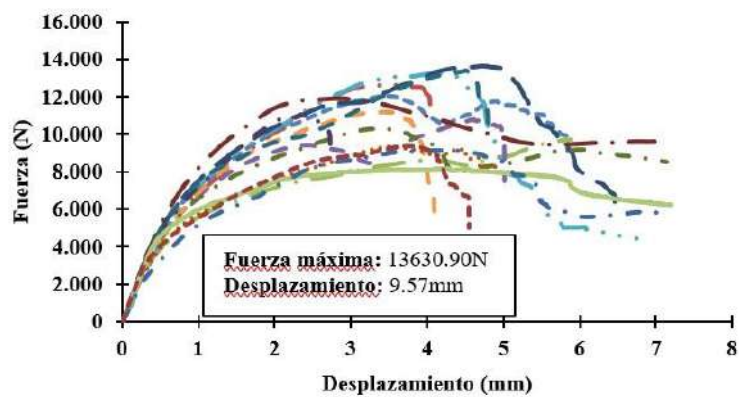


Figura 9
Comportamiento a pandeo debido a una carga distribuida

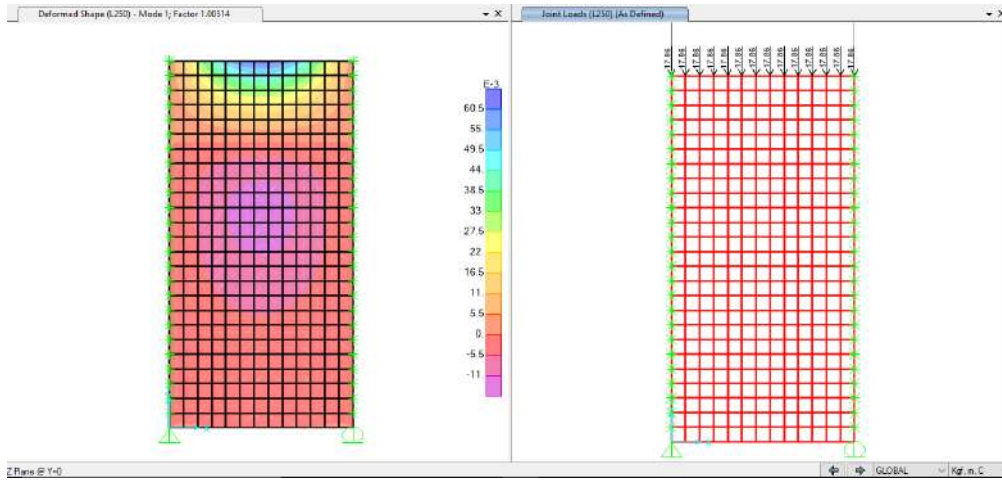


Figura 10
Vista en planta y visualización 3D del modo 1

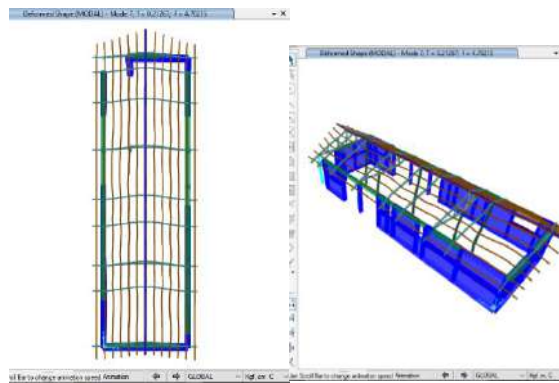


Figura 11
Vista en planta y visualización 3D del modo 2

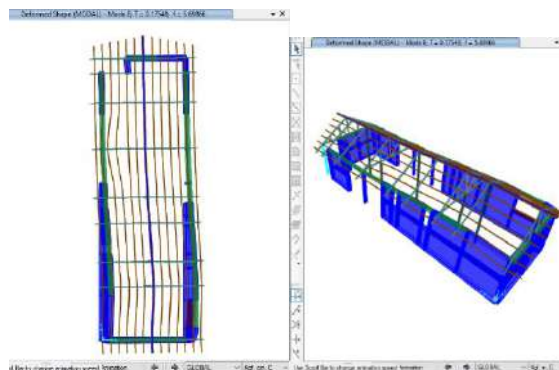


Figura 12

Ubicación de los instrumentos para el estudio de vibración ambiental

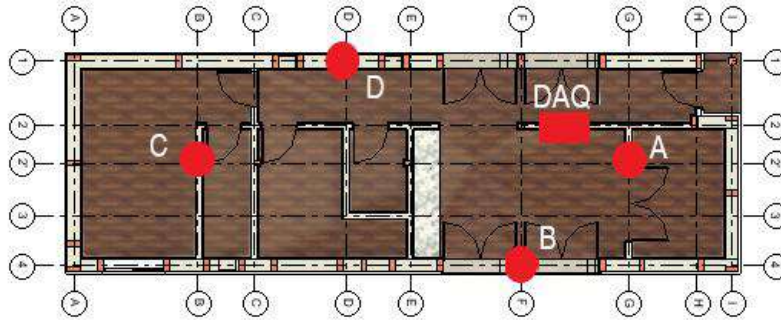


Figura 13
Influencia de los paneles OSB- Comportamiento del período

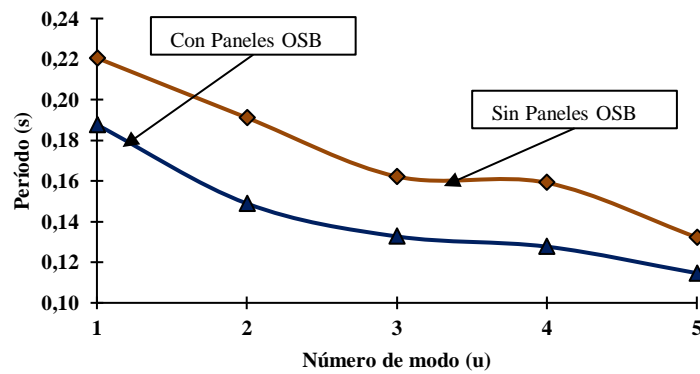


Figura 14
Secciones equivalentes utilizados en el software SeismoStruct

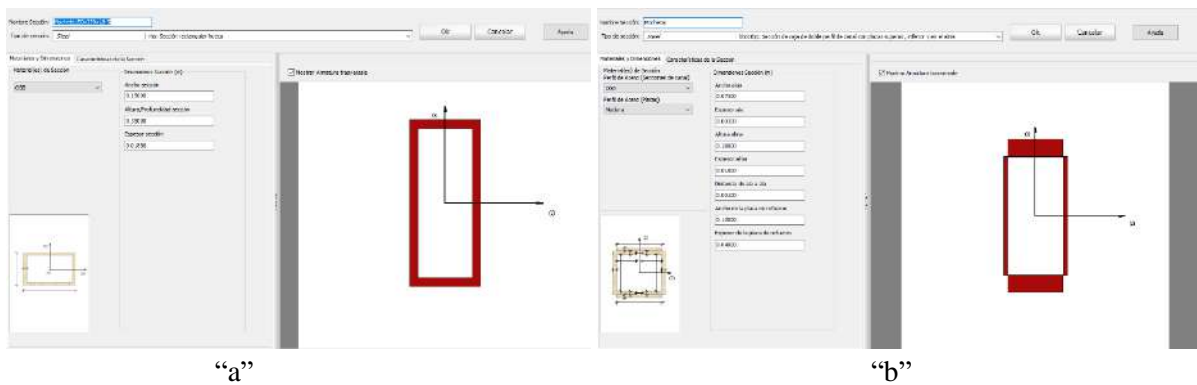


Figura 15

Periodos de los modelos creados y del análisis experimental

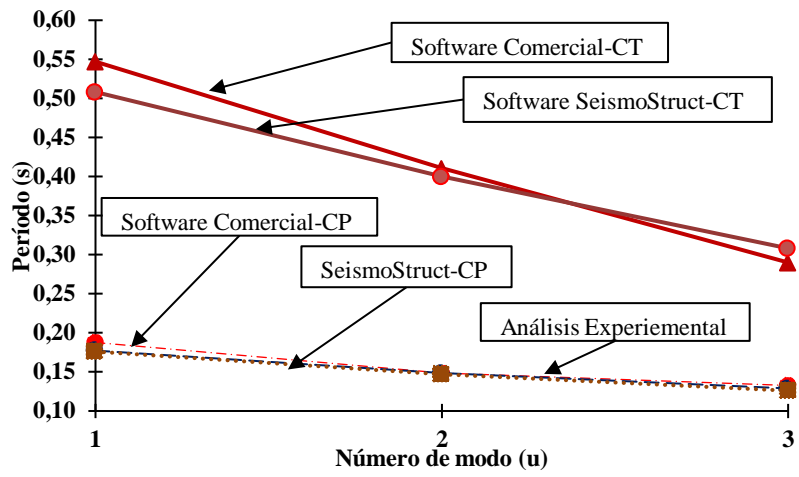
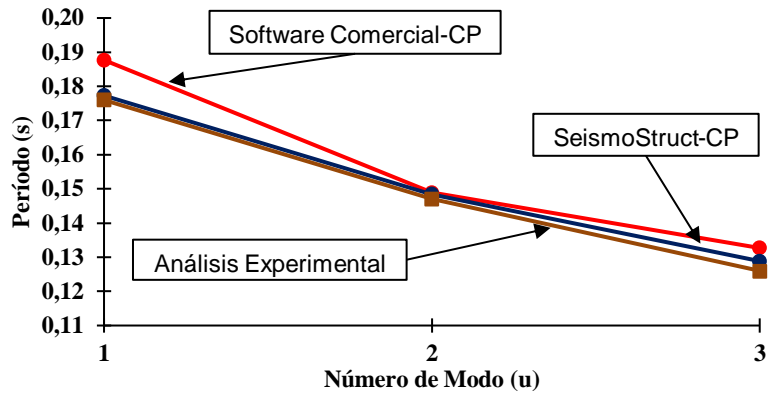


Figura 16

Comportamiento del análisis numérico y el análisis experimental





REVISTA INGENIO

Study on Acceptable Noise Standards for Motorcycles, in Accordance with the Ecuadorian Technical Regulation INEN 136 (1R), Assessed Through Dynamic and Static Tests

Estudio sobre los estándares de Ruido Aceptables para Motocicletas, de Acuerdo con el Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 136 (1R), Evaluados a través de Pruebas Dinámicas y Estáticas

Edwin Giovanni Puente Moromenacho [1](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Salgolqui (Ecuador)
Marco Vinicio Noroña Merchán [2](#) | [ID](#) Universidad Internacional del Ecuador UIDE, Guayaquil (Ecuador)
Mayra Cecilia Cruz Mangui [3](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Salgolqui (Ecuador)
Gladys Yolanda Moreno Guamán [4](#) | [ID](#) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Salgolqui (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 13/10/2023
Recepción tras revisión: 13/11/2023
Aprobación: 04/12/2023
Publicación: 31/01/2024

PALABRAS CLAVE

motocicletas, contaminación, ruido, gases de escape, ensayo.

ARTICLE HISTORY

Received: 13/10/2023
Received after revision: 13/11/2023
Approved: 04/12/2023
Accepted: 31/01/2024

KEY WORDS

motorcycle, pollution, noise, exhaust gases, static test

RESUMEN

En el año 2020 el Ecuador y el mundo entero se vio afectado por la más grande crisis sanitaria de los últimos tiempos. El covid 19 obligó a muchos de los ecuatorianos a buscar nuevas fuentes de ingresos, y encontraron en las motocicletas la posibilidad de hacerlo ya que las entregas con servicios a domicilio fue una modalidad que adaptaron muchísimos negocios. Este aumento de motocicletas trae consigo que aumente la contaminación, proveniente del ruido que estas producen. Es por esto que nos planteamos la incógnita de si en este crecimiento fuera de la tendencia que tuvo la venta de motocicletas se siguieron cumpliendo las normas y límites máximos de ruido que se permite a las motocicletas producir al circular en nuestro país. Para esto adoptamos el papel de laboratorio acreditado y realizamos los ensayos estáticos y dinámicos, siguiendo los procedimientos de la Directiva Europea 78/1015/CEE, a una muestra de cinco motocicletas para comprobar si cumplían o no con la norma INEN RTE 136 Motocicletas, que es en donde se exponen los valores máximos que pueden emitir por categoría de cilindrada. Con los resultados obtenidos fuimos capaces de concluir y hacer ciertas recomendaciones.

ABSTRACT

In the year 2020 Ecuador and the whole world was affected by the biggest health crisis in recent times. Covid 19 forced many Ecuadorians to look for new sources of income, and they found the possibility of doing so in motorcycles, since deliveries were a modality that many businesses adapted. This increase in motorcycles brings with it an increase in noise pollution. That makes us question ourselves of whether in this growth outside the trend that the sale of motorcycles had, the standards and maximum noise limits that motorcycles are allowed to produce to be able to circulate in our country continued to be complied with. For this, we adopted the role of an accredited laboratory and carried out the static and dynamic tests, following the procedures of the European Directive 78/1015/CEE, on a sample of five motorcycles to verify whether or not they complied with the INEN RTE 136 Motorcycles standard, which It is where the maximum values that can be emitted by displacement category are exposed. With the results obtained we were able to conclude and make certain recommendations.

1. INTRODUCTION

This article discusses of analysis of annual motorbike sales in Ecuador over the past six years reveals an evolution marked by the COVID-19 pandemic. From 2016 to 2019, the market experienced steady growth, reaching a peak of 144,727 units sold in 2019. However, in 2020, the impact of the global health crisis was reflected in an abrupt decline to 130,483 units. Surprisingly, in 2021, sales recovered significantly, reaching a record 164,551 units by November. This dramatic change is directly attributed to the measures implemented in Ecuador in response to the

COVID-19 outbreak. 2020 marked an exceptional year, with the detection of the virus in February and emergency measures announced in March, including lockdowns, curfews and vehicle restrictions. These measures had an immediate impact on the economy and mobility, leading to a substantial decrease in demand for motorbikes. However, as society adapted to the new normal, motorbikes became a safer mode of transport, driving a rebound in sales by the end of 2020.

The positive trend continued in 2021, highlighting the

motorbike market's ability to adapt to changing circumstances. Demand increased as motorbikes positioned themselves as a safe and efficient alternative, especially in a context where online shopping and home deliveries gained prominence. In addition, many unemployed individuals found motorbikes as a source of income, contributing to increased sales. The regulatory context also plays a crucial role in the Ecuadorian motorbike market. The issuance of the Ecuadorian Technical Regulation RTE INEN 136 (1R) "Motorcycles" establishes the requirements that these vehicles must meet before they can be marketed. Both locally assembled and imported motorbikes must undergo rigorous testing, including tests on the braking system, tyres, lights, exhaust emissions and sound level. Obtaining the "Certificate of Conformity" is essential for commercialisation and is granted by bodies such as the National Agency for Regulation and Control of Land Transport, Transit and Road Safety (ANT), the Ministry of Industries and Productivity (MIPRO) and the Ecuadorian Institute of Standardisation (INEN). The Association of Automotive Companies of Ecuador (AEADE) reports that approximately 70% of motorbikes on the market are locally assembled.

This underlines the importance of regulations and quality standards in the industry, as they affect both domestic production and imports from various countries. In addition to economic and regulatory dynamics, the issue of noise generated by motorbikes emerges as a critical factor, especially in a growing urban environment. The amount of noise to which a population is exposed has proven effects on human health and the surrounding ecosystem. The Ecuadorian state, through the Ministry of Environment (MAE), is responsible for ensuring compliance with noise-related regulations. The MAE carries out environmental audits, monitoring reports and verifications of compliance with environmental management plans to mitigate the negative effects of noise on health and the environment. In this context, urban planning becomes crucial, highlighting the need for noise maps that help to segment areas according to their level of noise production.

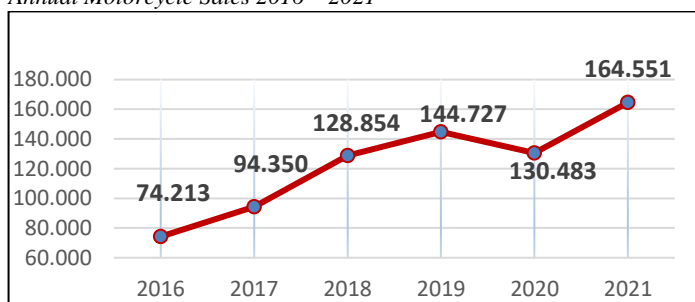
This tool facilitates the separation of residential, hospital and industrial areas, contributing to the well-being of the population and the preservation of the ecosystem. In conclusion, the motorbike market in Ecuador has experienced a trajectory notably influenced by the pandemic, demonstrating resilience and adaptability. The interplay between economic factors, regulations and environmental considerations plays an integral role in the development of this constantly evolving sector. Understanding these dynamics is essential to anticipate and address the challenges and opportunities that the

Ecuadorian motorbike market faces in the future[1]. This article not only contributes to the understanding of the current landscape of the motorbike market in Ecuador, but also provides valuable insight into the regulatory measures taken to mitigate noise pollution, while supporting its findings with concrete evidence from the field.

Motorcycle Market and the Pandemic

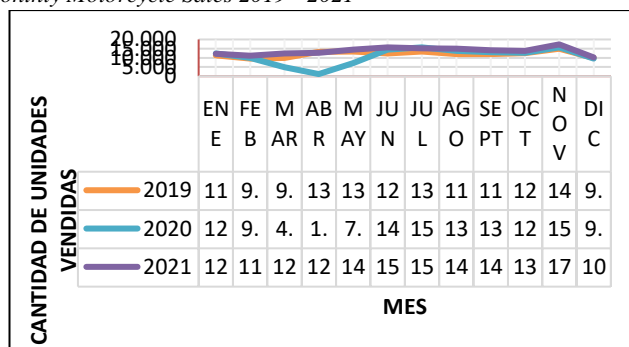
The annual motorcycle sales in our country over the last six years (2016 - 2021), we can observe that from 2016 to 2019, motorcycle sales showed consistent growth. In 2016, there were a total of 74,213 units sold, and in 2019, it increased to 144,727 units. However, in 2020, motorcycle sales decreased to 130,483 units. Subsequently, in 2021, sales rebounded and reached a record of 150,770 units sold until November 2021. Below, we will illustrate this behavior [2] [3] [4].

Figure 1
Annual Motorcycle Sales 2016 – 2021



To understand this behavior, we will focus on the last three years (2019-2021) by examining the monthly motorcycle sales figures (Figure 2):

Figure 2
Monthly Motorcycle Sales 2019 - 2021



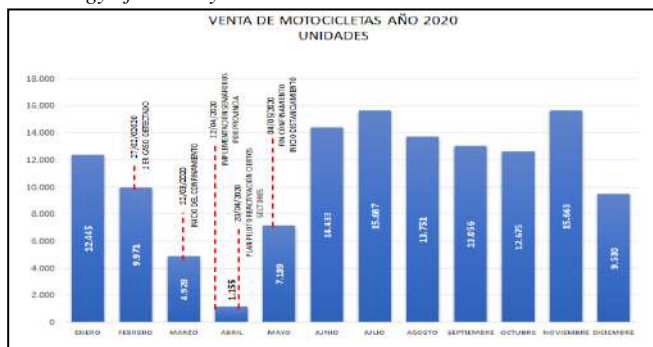
In the previous figure, the drop in motorcycle sales during the year 2020 is concentrated in the months of March and April. This is evident as the number of motorcycles sold in February for the years 2019 and 2020 is very similar, with 9,595 sold in 2019 and 9,971 in 2020.

This drastic reduction in motorcycle sales, deviating from the previous trend, can be attributed to the fact that in 2020, both Ecuador and the entire world faced the most significant public health crisis in recent memory. In our country, the COVID-19 virus was detected on February 27, 2020. Shortly thereafter, on March 12, authorities

announced some new policies, including declaring a state of health emergency, closing borders, imposing mandatory nationwide quarantine (except for medical staff and essential goods), implementing curfews, and enforcing vehicular restrictions with different schedules based on the affected regions [5].

In the following graph (Figure 3), we will compare the monthly motorcycle sales in 2020 with policies taken by our authorities due to the pandemic.

Figure 3
Chronology of Motorcycle Sales/Pandemic in 2020



The increase in motorcycle sales in April can be attributed to several factors. Motorcycles became a safer mode of transportation compared to buses, especially during the COVID-19. Many companies shifted to online shopping and home deliveries to reduce overcrowding and promote social distancing. Additionally, individuals who lost their jobs turned to motorcycles to generate income for themselves and their families [6]. This surge in motorcycle sales can be seen as a response to the changing dynamics brought about by the pandemic, with people seeking safer and more flexible mobility options.

The Ecuadorian State as a Regulatory Entity

The Ecuadorian government, responsible for ensuring the compliance of citizens' rights related to safety, the protection of human, animal, and plant life, the preservation of the environment, consumer protection against deceptive practices, and punishments, as stated in Article 1 of the Ecuadorian Quality System Law, issues the Ecuadorian Technical Regulation RTE INEN 136(1R) "Motorcycles." This regulation establishes all the requirements that motorcycles must meet before they can be marketed.

Regardless of the origin of the motorcycles, whether they are assembled inside or imported, they must undergo the required tests outlined in RTE INEN 136(2R) "Motorcycles." These tests cover aspects such as braking systems, tires, lighting, gas emissions, and acceptable noise levels. Successfully passing these tests results in the issuance of the "Certificate of Conformity," which

authorizes their commercialization. The entities responsible for granting the homologation or conformity certificate are the National Commission of Land Transport and Traffic (CNT), the Ministry of Industries and Productivity (MIPRO), and the Ecuadorian Institute of Standardization (INEN). [7] [8] [9]

The Noise as a Pollution Factor

The amount of noise to which a person is exposed has been proven to have various effects on an individual's health, such as sleep disorders, stress, hearing loss, and alterations in character. Natural ecosystems are also affected by these sounds and tend to migrate. This causes a series of negative effects and, in some cases, irreparable damage.

The quantity of noise is a measurable, regulatable, and even plannable characteristic. By this, we mean that a growing city typically zones areas, whether they are industrial, residential, hospital, commercial, or protected. Each of these zones, based on the number of people or traffic they attract (mobile sources), the equipment they use (fixed sources), and the hours they operate, will have different levels of noise production. With this information, authorities can create what are known as noise maps [10]. Noise maps are studies of sound levels produced by a specific area at a defined time and the population that is or will be affected by it. This is a valuable tool in urban planning for a city, as it allows, for example, the separation of residential or hospital areas from industrial areas and protected zones from major noise sources like airports, benefiting both people and the ecosystem [11].

In our country, the competent authority is the Ministry of the Environment (MAE). The Ministry, in order to ensure compliance with noise-related regulations, has functions that include conducting environmental audits, monitoring reports, and verification of compliance with environmental management plans [12].

Justification for this analysis

This research is being conducted due to the growth experienced in the motorcycle market in recent years. There is a need to practically verify whether these motorcycles meet the necessary requirements for commercialization, with the aim of safeguarding the safety of individuals and the environment. The analysis and conclusions drawn will be based on a comparison of the results obtained from dynamic and static tests with the limits outlined in the Ecuadorian Technical Regulation RTE INEN 136 (1R).

Objetives

General Objective

To verify, through dynamic and static tests outlined in the European Directive 78/105/CEE, that the noise generated

by motorcycles of various engine capacities and brands circulating in our country complies with the limits specified in the Ecuadorian Technical Regulation RTE INEN 136 (1R).

Specific Objectives

- To use the equipment needed to perform sound level measurements generated by motorcycles.
- To apply dynamic and static tests, as outlined in the European Directive 78/108/CEE.
- To determine the noise level produced by the tested motorcycles.
- To confirm the results against the limits specified in the Ecuadorian Technical Regulation RTE INEN 136 (1R).

Theoretical framework

The following is an overview of the regulations on exhaust noise emissions and test procedures for motorbikes in Ecuador:

- Motorcycles are defined as two-wheeled vehicles with an internal combustion engine, a displacement greater than 50 cm³, and a design speed exceeding 45 km/h [13]. The NTE INEN 2656 standard, which addresses vehicle classification for Ecuador, categorizes the motorcycles studied in our research as Category L, subcategory L3.

- Exhaust noise refers to the sound produced by combustion gases as they exit the engine through the exhaust pipe. It is measured in decibels (dB) using dynamic and static tests.

- A dimensionless measurement is used to express the ratio between a measured quantity and a reference quantity. It is employed to describe sound pressure levels, power, or intensity. Its symbol is "dB."

- Environmental noise refers to the noise present in the external environment, which has measurable or quantifiable intensity. It includes fixed and mobile noise sources.

- Admissible sound levels are the maximum limits of exhaust noise emissions, measured in decibels, allowed for motorcycles according to their engine displacement category.

- A type of test used to measure a vehicle's noise emissions, performed with the vehicle and drivetrain stationary but the engine running.

- A type of test used to measure a vehicle's noise emissions, conducted while the vehicle travels a specific distance in a test field, at predetermined speeds, gears, and engine revolutions.

- A document issued by the Ecuadorian state confirms that a duly identified product, process, or service complies with a technical regulation, technical standard, or other specified normative document prior to its commercialization. This certificate must be requested by motorcycle assemblers or importers before commercialization, following successful testing.

- An organization that has demonstrated technical competence to carry out conformity assessment activities through compliance with international, national standards, and other requirements set by the accreditation body.

- An organization or laboratory authorized by the Ministry of Production, Foreign Trade, Investments, and Fisheries (MPCEIP) in accordance with the provisions of the Ecuadorian Quality System Law to conduct specific conformity assessment activities.

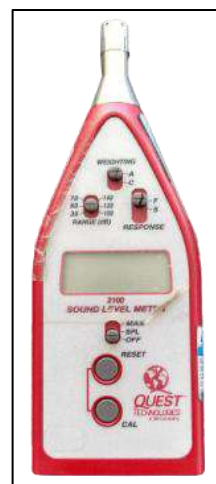
Equipment

The equipment used in the tests were operated by ELICROM, a company located in the city of Guayaquil that serves as an accredited laboratory. The following equipment was used [13] [14] [15]:

- Precision Sound Level Meter: 3M Quest Technologies brand, model 2100, with a measurement range of 0 to 140 decibels (Figure 4).

Figure 4

Precision Sound Level Meter



- Noise Calibrator: 3M Quest brand, model QC/10 - QC/20. This device emits a stable acoustic signal at a controlled frequency of 114 dB (Figure 10). This emitted signal can be read by the sound level meter to verify its calibration (Figure 5).

Figure 5
Noise regulator



- Tape Measure: Pretul brand, with a maximum length of 10 meters, and measurements in centimeters or meters (exhibit Figure 6).
- Metal Square: Swanson brand, a metal tool in the shape

of an isosceles triangle, with a right angle and two 45-degree angles (exhibit Figure 7).

- Hygrometer-Thermometer: Elicrom brand, model SH-110. This equipment is used to record relative humidity (%) and temperature of the environment on the day and time when the tests are conducted (exhibit Figure 8).
- Stroboscopic Tachometer: Equipment used to measure the engine's rotational speed (RPM) in those motorcycles where it is not displayed on the dashboard (exhibit Figure 9).
- Metal Plumb Bob: A tool used to mark the exact position of the exhaust pipe's outlet on the ground (exhibit Figure 10).

2. METHOD

A sample of 5 motorcycles was tested, which fall within the range of engine displacements from 150 to 650 cm³. The sample includes motorcycles of different origins, engine size, materials, number of exhaust outlets, exhaust device locations, etc

Table 1
Tested motorcycle specifications

Specifications of the Tested Motorcycles					
	Moto # 1	Moto # 2	Moto # 3	Moto # 4	Moto # 5
Origin	Chinese	India	Colombia	Chinese	Equator
Production Year	2018	2019	2019	2018	2019
Segment	Utilitarian	Utilitarian	Dual purpose	Dual purpose	Endurance
Mileage	10.588	6.595	25.954	8.045	19.123
Cylinder capacity (cm3)	248	155	645	250	200
Maximum engine rpm	8.500	8.000	8.000	8.000	8.000
Transmission	Mechanics	Mechanics	Mechanics	Mechanics	Mechanics
Marches	5	5	6	5	5
Tailpipe location	Right	Right	Right	Right	Right

Author:Arnoldo Alencastro, Marco Rodríguez

The procedure for conducting static tests.

Static tests involve accelerating the motorcycle, either in neutral or with the help of a stand that lifts the rear wheel, until a given number of engine revolutions is reached. The sound produced is then measured using a precision sound

level meter. This was done in accordance with the specific requirements outlined by the regulations:

The test area must be an enclosed space that forms a rectangle, leaving a minimum of 3 meters of space between

the ends of the motorcycle (as shown in Figure 12).

The ground should be a hard material like concrete or asphalt.

- The tests required the presence of two individuals. One person was responsible for accelerating the motorcycle to reach the specified engine revolutions and maintaining it at that RPM, while the other person operated the sound level meter to take readings.
- As mentioned earlier, the motorcycle must be neutral or on a stand that allows the rear wheel to be lifted. It was ensured that the motorcycle was positioned perpendicular to the ground.
- With the motorcycle in a perpendicular position, a plumb bob was used to mark the exact position of the exhaust pipe's mouth on the ground with a point (as shown in Figure 13). This point was used, in conjunction with a laser level, to mark the vertical plane in which the exhaust gas outlet is located (as shown in Figure 14).
- By standard, the orientation of the sound level meter is set at an angle of $45^{\circ} \pm 10^{\circ}$ degrees relative to the vertical plane in which the exhaust gas outlet is inscribed. A metal square is used for this purpose. One of its two equal sides is placed against the line marked by the laser level, pointing with the acute angle at the point marked on the ground (exhibit figure 14). The orientation line of the sound level meter will be the one indicated by the longer side of the square.
- Once the orientation line is marked, the standard specifies that the sound level meter should be positioned at 50 centimeters from the marked point on the ground, or in other words, 50 centimeters from the vertical plane formed by the exhaust gas outlet (exhibit Figure 15). Measure out the 50 centimeters and mark another point on the ground. This new point will be the position of the sound level meter's microphone, which will be used to test all the motorcycles.
- Proceed to place the sound level meter, ensuring that the minimum height is 20 centimeters from the ground. To verify this, you can use the metal square and the tape measure (exhibit Figure 16). The sound level meter comes equipped with a tripod, which will be of great help to keep it in position.

- If the motorcycle does not indicate the engine revolutions on its dashboard, it will be necessary to use the strobe gun to bring the motorcycle to the required engine speed (exhibit Figure 17).

- The regulations indicate that measurements should be taken when the motorcycle is stabilized at a certain number of revolutions, as given by the following formula (where S represents the maximum revolutions specified by the manufacturer):

$$\frac{S}{2} \text{ if } S \text{ is higher than } 5000 \text{ rpm}$$

$$\frac{3S}{4} \text{ if } S \text{ is lower than } 5000 \text{ rpm}$$

- In the sound level meter, the reaction time is set to "F" for fast, the decibel range is set to 50 - 120 dB, since the maximum value according to the standard is 86 dB, and the curve is set to "A." The accuracy of this equipment must be verified with the noise calibrator at the end of each test (exhibit figures 18, 19).
- The motorcycle is accelerated, stabilized at the previously defined engine speed, and the value is recorded. Three consecutive measurements will be taken for each motorcycle. The values will be considered valid when there is no bigger than 2 dB.

Procedure for carrying out dynamic tests

Dynamic tests are those in which the sound of a motorcycle passes a given point. The first step is to establish a point and mark it on the ground. With the help of a plumb line, we will position the tip of the precision sound level meter just above this point, on a stand that will help keep it stable during the tests.

This point will be at a height of 1.20 meters from the ground, and these requirements must be considered:

- Around this point, within a minimum radius of 50 meters, there should be no large objects such as fences, signs, buildings, or mountains that could affect the acoustic field in the area.
- Keep in mind that the noise will be measured over a period, so there should be no external noise sources around this point apart from the motorcycle being tested. Examples of this could be traffic, equipment like drills or grinders working nearby, street vendors, etc. The regulations state that the difference in noise between the selected point for the sound level meter and the center of the track where the motorcycle will circulate must be a maximum of ± 1 dB.

- It is also important to consider the noise generated by the moving motorcycle due to friction with the ground during the test. This is why the regulations specify that the ground must be made of concrete, asphalt, or any other hard material that is dry and free from loose soil or grass.

- During the test, the motorcycle will cover 20 meters, from line A-A' to line B-B' and back. The motorcycle will follow a straight path, which will be a reference line called C-C'.

- The sound level meter must be placed halfway along the reference line C-C' at 7.5 meters.

After delineating the location and setting up the equipment, our attention must shift to the motorcycle; it is necessary to know the maximum engine speed, displacement, and the number of gears in the transmission system. This data is used by the regulations to determine the parameters followed by the driver:

- The motorcycle must have reached its operating temperature, have sufficient fuel, and its exhaust system must be in good condition without alterations.

- The approach speed to the starting line of the test will be 50 km/h, steady and with the engine speed (rpm) between 50% - 75% of the manufacturer's maximum recommendations.

- Once the front tire crosses the starting line A-A', the driver must accelerate to the maximum throughout the entire journey until the rear tire of the motorcycle crosses the line B-B'. Afterward, the driver must immediately release the throttle and allow the motorcycle to decelerate without abrupt braking.

- The gear or gearshift to be used for the test is indicated by the regulations:

- Regarding the number of tests that must be conducted for each motorcycle, the regulations state that there should be 2 tests on each side of the motorcycle. The results should

be rounded to the nearest decibel, and they will only be accepted as valid when the difference between them does not exceed 2 dB. The measurement value to reported will be the result in the measurements minus 1 dB to counteract possible inaccuracies.

- The data obtained will be recorded in a test report. The report will also contain information about the motorcycle (manufacture, model, chassis number, maximum rpm, origin), environmental conditions (temperature, relative humidity), information about the sound level meter (initial verification, serial number), and the results separated by the side of the motorcycle (right or left).

- The tested motorcycle will be considered in compliance when the result of the four measurements is equal to or less than the limits set forth in the RTE INEN 136 (2R) Motorcycles, for the category of that motorcycle. In all other cases, it will be considered non-compliant [16] [17].

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results will be compared to the maximum noise limits set forth by the Ecuadorian technical regulation RTE INEN 136 (1R) "Motorcycles" for their respective categories, to determine which of them complies with the conformity of this requirement. As we can see below, the results obtained for each motorcycle in the static tests tend to be higher than those obtained for the same motorcycle in the dynamic tests [18]. This is due to various factors, including the fact that in dynamic tests, the sound level meter is considerably farther away from the motorcycle compared to static tests. Dynamic tests are conducted in an open area, allowing for the dissipation of noise generated, and in dynamic tests, the sound level meter has less time to capture precise noise measurements because the motorcycle is in motion and moving away from it, whereas in static tests, the amount of noise to which the sound level meter is subjected remains constant.

Table 2*Presentation of Static Test Results*

Presentation of Results: Static Test				
Vehicle	Origin	Cylinder capacity	Test value	Maximum value per standard
Motorcycle # 1	Chinese	240 cm ³	81 dB	83 dB
Motorcycle # 2	India	155 cm ³	79 dB	83 dB
Motorcycle # 3	Colombia	645 cm ³	83 dB	86 dB
Motorcycle # 4	Chinese	250 cm ³	82 dB	83 dB
Motorcycle # 5	Equator	200 cm ³	87 dB	83 dB

When comparing the results obtained with those specified in the Technical Regulation INEN 136, we can observe that, in this test, the Ecuadorian-made motorcycle exceeds the value set by the standard by 4 decibels [18]. As the other motorcycles, fall within the allowed range. In other words, the noise they produce is lower than what the standard allows. The results of this test tend to be higher

than those obtained in dynamic tests and are not considered by the RTE INEN 136 (1R) "Motorcycles" to determine a motorcycle's compliance with the regulation. However, they provide an indication of the noise produced by a motorcycle tested on a bench and, therefore, offer a clear idea of what will happen in the dynamic tests.

Table 3*Presentation of Dynamic Test Results*

Presentation of Results: Dynamic Test					
Vehicle	Origin	Cylinder capacity	Value obtained in Test	Maximum value per standard	Conformity
Motorcycle # 1	Chinese	240 cm ³	74 dB	83 dB	Yes
Motorcycle # 2	India	155 cm ³	73 dB	83 dB	Yes
Motorcycle # 3	Colombia	645 cm ³	80 dB	86 dB	Yes
Motorcycle # 4	Chinese	250 cm ³	78 dB	83 dB	Yes
Motorcycle # 5	Equator	200 cm ³	77 dB	83 dB	Yes

Note: The exposed values have been rounded to the nearest decibel and subtracted one unit as indicated by the standard.

In the case of the results through the Dynamic test, when comparing them to the limits specified by the standard, we can see that all of the motorcycles are below these limits, meaning they are in compliance.

Based on the results from the static tests, the only

motorcycle that was in question regarding whether it would exceed the limits set by the regulation in these tests was the Ecuadorian-made one, which exceeded the regulation for its displacement category by 4 decibels (87 versus 83) in the static test. However, in the dynamic test, it remained 6

decibels below the regulation, which grants it the compliance required for commercialization and circulation in our country.

4. CONCLUSIONS

As we have observed throughout this study, the level of noise in a city is a measurable, regulatable, and even plannable characteristic. The authorities in our country have the information and tools to establish noise levels that are not harmful to the health of their residents and ecosystems, as well as the obligation to enforce the standards put in place for this purpose.

In unusual circumstances, such as the COVID-19, it can be challenging to predict population behaviors or trends. The increase in motorcycle sales post-pandemic can be considered one of these trends, as we saw a significant surge in sales from 1,155 units in April 2020 to 14,433 units in June 2020. While this was good for the market and Ecuadorian families, we must not neglect to enforce our regulations to ensure that today's solution does not become tomorrow's problem.

Motorcycles, represent a mobile noise pollution source, producing an average of around 83 decibels, depending on their engine size. If we multiply this value by the number of motorcycles circulating in the city during rush hours, we will have a substantial number of decibels adding to the noise that affects the population. Furthermore, in 2020, technical vehicle inspections were suspended due to the pandemic. In other words, we increased the number of motorcycles on the road in our country and suspended the review of compliance requirements for their circulation.

Through our static tests, we were able to demonstrate that the imported motorcycles complied with the maximum limits specified in the INEN RTE 136 (1R) "Motorcycles" regulation, there was a case of a motorcycle, #5, assembled in Ecuador that exceeded the maximum values allowed by 4 decibels. Although the results obtained from this type of test are not considered to determine

compliance with the regulation, it is a factor to consider for domestically assembled products.

Through this study, we were able to achieve the objective of determining that both domestically assembled and imported motorcycles comply with the technical regulation INEN RTE 136 (1R) "Motorcycles" in a small sample. However, we believe that the difference between the regulation's limit and the values obtained could improve [18].

Motorcycle assemblers in our country source most of the components from China. Very few parts are manufactured locally. Since the amount of noise produced by a motorcycle is controlled by the exhaust device, and this, in turn, is being imported for assembly in our country, we should consider importing higher-quality products. We should require importers or manufacturers to submit the respective supplier's declaration of conformity, a document in which the manufacturer or importer takes responsibility for having conducted tests to confirm that their products comply with the INEN RTE 136 (1R) "Motorcycles" regulation.

The INEN RTE 136 (1R) "Motorcycles" regulation adopts limit values from the European Directive 78/1015/CEE, which was established in Brussels in 1978. Over the years and with technological advancements, we should consider that we can acquire and producing products that generate less noise than what was specified in that year. This is mentioned because the motorcycles that did comply with the conformity in the tests are also very close to the limits [1].

Efforts should continue to reduce the amount of noise that our society generates, not only due to the impact on people but also because it represents an important factor in environmental conservation.

REFERENCES

- [1] Consejo de la Unión Europea, "Directiva 78/1015/CEE del Consejo, de 23 de noviembre de 1978, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros sobre el nivel sonoro admisible y el dispositivo de escape de las motocicletas," 1978.
- [2] Asociación de Empresas Automovilísticas del Ecuador, "AEADE," (2022 Diciembre 22). [En línea]. Available: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2023/01/12.-Sector-en-Cifras-Resumen-Diciembre.pdf>.
- [3] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, "AEADE," (2022 Diciembre 22). [En línea]. Available: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2023/01/12.-Sector-en-Cifras-Resumen-Diciembre.pdf>.
- [4] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, "AEADE," (2022 Diciembre 08) . [En línea]. Available: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2022/12/BOLETIN-DE-VENTAS-PARA-PRENSA-DICIEMBRE-2022.pdf>.
- [5] Líderes, "12 ensambladoras de motos se asocian para tomar velocidad," 2020.
- [6] Mercado Automotriz Ecuatoriano, "General Industria - YTO," pp. 1-8, Agosto 2021.
- [7] Servicio Ecuatoriano de Normalización,

- "Reglamento Técnico Ecuatoriano INEN 136 1(R) «Motocicletas,» 2019.
- [8] Servicio Ecuatoriano de Normalización, "Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2656-1. Clasificación Vehicular según las Normas INEN," *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí*, 2016.
- [9] Ley Orgánica de Transporte Terrestre Tránsito y Seguridad Vial, Quito: Registro Oficial Suplemento 398 de 07-ago.-2008, 2008, p. 48.
- [10] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, "Directiva 2002/51/CE Del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de julio de 2002 aobre la reducción del nivel de emisiones contaminantes de los vehículos de motor de dos o tres ruedas, y por la que se modifica la Directiva 97/24/CE," 2002 Julio 19.
- [11] Automagazine.ec, "Ventas de la industria automotriz en Ecuador durante el 2020," 2021 Enero 13.
- [12] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, "Ecuador le dice ¡NO AL RUIDO!," *ambiente.gob.ec*.
- [13] H. Y. Siregar, "Analysis on the characteristics and driving conditions for motorcycle and passenger car in Banda Aceh," *AIP Conference Proceedings*, vol. 2711, 2021.
- [14] ISO, "ISO/IEC 17067:2013(es) Evaluación de la conformidad - Fundamentos de la certificación de producto y directrices para los esquemas de certificación de producto," *Online Browsing Platform (OBP)*, 2013.
- [15] ISO, "ISO/IEC 17025:2017(es) Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración," *Online Browsing Platform (OBP)*, 2017.
- [16] Organismo de Normalización Española, «UNE-EN ISO/IEC 17020:2012,» *une.org*, 2012.
- [17] El Universo, "El 'delivery' ayuda a sostener la venta de las motos en el mercado ecuatoriano," *eluniverson.com*, p. Noticias, 2020 agosto 29.
- [18] TULSMA, *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente*, Quito: Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-mar.-2003, 2003.
- [19] B. Singh, "Assessment and Mapping of Noise Pollution Levels in Bus Stands: A Case Study of Haryana State, India," *MAPAN*, vol. 38, pp. 827 - 840, 2023.
- [20] A. Tobías, "Health impact assessment of traffic noise in Madrid (Spain)," *Environmental research*, vol. 137, pp. 136-140, 2015.
- [21] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, "Módulo de información ambiental 2014," www.ecuadorencifras.gob.ec, 2014.

Exhibit

Figure 6
10-meter tape measure



Figure 7
Metal square

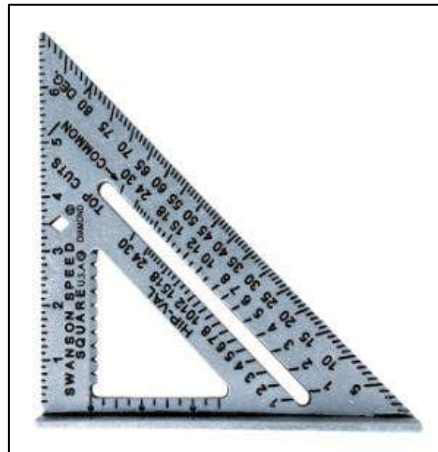


Figure 8
Thermo-hygrometer



Figure 9
Stroboscope gun



Figure 10
Metal plumb bob



Figure 11
Bosch brand laser level



Figure 12

Diagram of the area for static testing

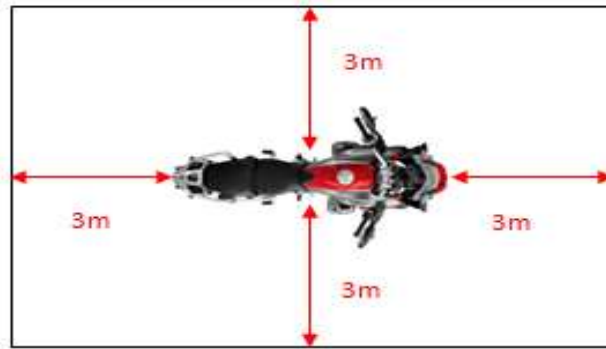


Figure 13

Using a plumb bob to mark a point on the ground.



Figure 14

Using a laser level to trace a vertical plane.



Figure 15

The sound level meter location set at 45 degrees.

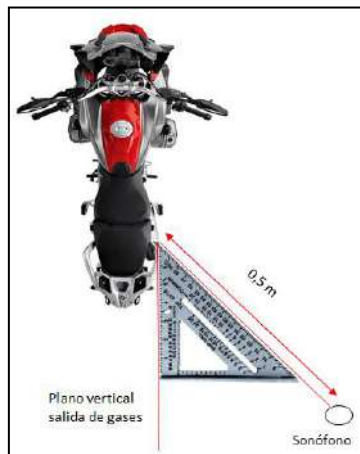


Figure 16

Verification of the sound level meter position



Figure 17

Measurement with a stroboscopic gun



Figure 18

Settings of the sound level meter for tests



Figure 19
Sound level meter calibration verification





REVISTA INGENIO

Modelación de un Muro y Losa de Reacción para Ensayos Cuasi-Estáticos, Aplicando el Método de Elementos Finitos

Modeling of a Wall and Reaction Slab for Quasi-Static Tests Using the Finite Element Method

Andreina Rosa Morillo Valencia [1](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda/Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

Carla Fernanda Toapanta León [2](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda / Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

Sigifredo Décimo Díaz Mendoza [3](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda / Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

Diego Armando Arévalo Chafuel [4](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda / Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

Melisa Natalia Herrera Quishpe [5](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda / Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

Christian Michael Gómez Soto [6](#) | [ID](#) Centro de Investigación de la Vivienda / Escuela Politécnica Nacional, Quito (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 19/10/2023
Recepción tras revisión: 28/11/2023
Aprobación: 01/12/2023
Publicación: 31/01/2024

PALABRAS CLAVE

Modelación, método de elementos finitos (MEF), sistema de reacción, muro, losa, ampliación.

ARTICLE HISTORY

Received: 19/10/2023
Received after revision: 28/11/2023
Approved: 01/12/2023
Accepted: 31/01/2024

KEY WORDS

Modeling, Finite Element Method (FEM), reaction system, wall, slab, expansion.

RESUMEN

Para realizar ensayos cuasi-estáticos en elementos estructurales se utilizan sistemas de reacción conformados por losas y muros. La presente investigación permitió conocer el estado actual de una estructura con un sistema de reacción compuesto por una losa y un muro en forma de "L". Se emplearon programas computacionales para su revisión y las características mecánicas de los materiales colocadas en el modelo matemático fueron obtenidas a través de ensayos experimentales. Los resultados obtenidos evidencian que la capacidad actual de la estructura es mayor a la demanda, adicionalmente para el sistema de reacción se determinó la carga máxima que resiste. A partir de la verificación de la estructura existente se propone el diseño de la ampliación del muro de reacción con una capacidad máxima de 490 [kN] y de la infraestructura del CIV con un área aproximada de 400[m²], lo cual generará un aporte científico al servicio de la sociedad.

ABSTRACT

To carry out quasi-static tests on structural elements, reaction systems made up of slabs and walls are employed. The present investigation allowed us to know the current state of a structure with a reaction system composed of a slab and an "L"-shaped wall. Computer programs were used for its review and the mechanical characteristics of the materials placed in the mathematical model were obtained through experimental tests. The results obtained show that the current capacity of the structure is greater than the demand; additionally, for the reaction system, the maximum load it resists was determined. Based on the verification of the existing structure, the design of the expansion of the reaction wall with a maximum capacity of 490 [kN] and the CIV infrastructure with an approximate area of 400 [m²] is proposed, which will generate a contribution scientist at the service of society.

NOMENCLATURA

CIV: Centro de Investigación de la Vivienda.

MEF: Método de elementos finitos.

C_{SR} : Carga viva correspondiente a la fuerza del gato hidráulico y marco de carga en el Sistema de Reacción.

V_D : Cortante Basal Dinámico.

V_E : Cortante Basal Estático.

ρ_t : Cuantía Transversal.

ρ_l : Cuantía Longitudinal.

A_s : Área del acero de refuerzo [cm²].

A_{cv} : Área bruta de la sección transversal [cm²].

f'_c : Resistencia a compresión del concreto [MPa].

f'_y : Resistencia a la fluencia del acero [MPa].

1. INTRODUCCIÓN

En muchas partes del mundo, el diseño y construcción de estructuras tienen la tendencia de usar procedimientos que imponen criterios empíricos en el análisis; esto depende del uso que se le vaya a dar a cada tipo de edificación [1]. Este problema se afronta mediante el desarrollo de técnicas y productos innovadores que mejoren la industria de construcción [2]. Con este propósito, se crearon varios laboratorios alrededor del mundo enfocados a la investigación (teórica-experimental) y avance de la ingeniería estructural. A continuación, se presentan algunos de estos laboratorios.

En España, el Laboratorio de Construcción de la Universidad de Coruña se encamina al desarrollo de la investigación y estudio de construcción mediante el análisis experimental. Este laboratorio se conforma por un muro de reacción, losa de carga, pórtico de gran luz, prensa MTS, actuadores hidráulicos, banco de pretensado, entre otros [3].

En México, el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la UNAM fue creado en el año 1956 y se ha destacado por estudiar novedosos sistemas constructivos y validar varios procedimientos de diseño. Cuenta con equipos para realizar ensayos, entre los que se menciona una losa de ensayos, muro de reacción, gatos hidráulicos, marco de carga dinámico, grúa, actuadores dinámicos, marcos metálicos, entre otros [4].

En Colombia, el Laboratorio de Estructuras Alejandro Sandino Pardo se orienta al aprendizaje, la investigación y al desarrollo nacional e internacional, a través, de la evaluación de elementos y sistemas estructurales. Se constituye por una nave principal, en la que se encuentra: el muro de reacción en forma de “L” y la losa de reacción; además, posee puentes grúas, un marco de carga y actuadores dinámicos [5].

También, en Colombia se encuentra ubicado el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes, en el cual se realizan ensayos a modelos estructurales en tamaño real o a escala, permitiendo el desarrollo de investigación experimental de elementos y sistemas estructurales. Se conforma por un muro de reacción en forma de “L” y una losa de reacción, además, tiene un puente grúa, máquinas universales, marco de ensayos y actuadores hidráulicos [6].

En Ecuador, el Centro de Investigación de la Vivienda (CIV) de la Escuela Politécnica Nacional, fue creado en el año 2002 para atender las necesidades habitacionales, mediante la aplicación de conocimientos e investigaciones teóricas y experimentales, basándose en los códigos de

construcción vigentes para garantizar soluciones viables, reales y confiables dirigidas al beneficio de la sociedad [7]. La infraestructura del CIV cuenta con: una edificación conformada por un sistema de pórticos de hormigón armado y una cubierta con perfiles de acero laminados en caliente. Además, posee un sistema de reacción que incluye, un muro en forma de “L” de espesor de 60 [cm] y una losa de 80 [cm]. Entre los principales equipos que posee para realizar los ensayos están: un marco de carga de 981 [kN], gatos hidráulicos de 981 [kN] y 1962 [kN], sistemas de adquisición de datos y medidores de deformación.

La demanda de estudios requeridos al CIV, así como el área total actual del centro, para el desarrollo de investigaciones y la atención a las actividades de apoyo a la docencia, servicios especializados y vinculación con la sociedad, han sobrepasado la capacidad de la infraestructura del centro.

En este contexto, es necesario realizar la evaluación de la infraestructura existente, así como del sistema de reacción que lo conforman para verificar su correcto funcionamiento. Adicionalmente, se diseñará la ampliación del muro de reacción (para una capacidad máxima de 490 [kN]) y la infraestructura del CIV, partiendo de los análisis y pre-diseño de todos sus elementos.

Este tipo de estructuras que estarán sometidas a esfuerzos puntuales requieren un análisis minucioso y discreto como el método de elementos finitos (MEF).

Para modelar la estructura se aplica el método de elementos finitos, el mismo que permite la implementación de modelos computacionales complejos que posibilitan el análisis y diseño adecuado de los sistemas estructurales a evaluar [8].

Se emplea como base teórica normativa nacional NEC-15 [9] e INEN [10], en conjunto con normativa internacional como la ASCE 41-17[11], ACI 318-19[12], ASTM C39 [13], ASTM C42[14], ASTM C-805[15] y ASTM D2850-15 [16] para la revisión y diseño de los elementos estructurales, así como para la realización de ensayos experimentales.

2. MÉTODO

2.1 Investigación Preliminar/ Modelación de la Estructura Existente

Partiendo de la recopilación inicial de información existente se presentan los valores empleados para las distintas etapas: ensayos, modelación, interpretación de resultados, diseño, verificación y ejecución de productos

resultados [22].
 finales, que facilitan la representación de la estructura de acuerdo con las características reales actuales.

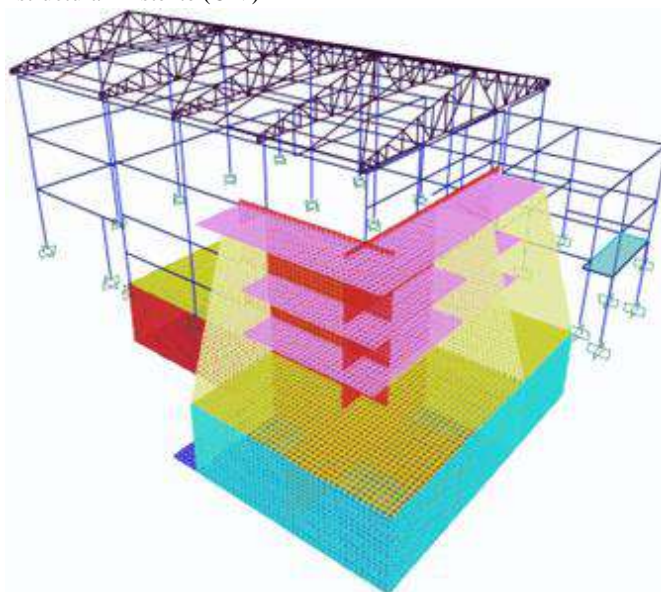
En la Figura 1, se observa la estructura existente modelada en un software computacional utilizando el MEF. De acuerdo con Álvarez [17], Aravena [18], Turcios [19] y Casanova [20] el MEF representa un enfoque de aproximación aplicado a problemas de ingeniería. Su fundamento radica en la conversión de un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto, un proceso conocido como discretización del modelo; lo que permite un análisis individual de cada componente para luego ensamblar el sistema completo.

Como resultado, este proceso proporciona datos cruciales, como desplazamientos, distribución de momentos de flexión y torsión, así como fuerzas cortantes, permitiendo una comprensión profunda del comportamiento estructural [21].

En este caso se emplean elementos tipo frame y shell para su representación, los cuales están relacionados con los análisis y el cálculo computacional requerido [9].

Para una mayor precisión se genera un modelo con mallado uniforme que se empleará para la distribución de cargas, evitando cambios bruscos de geometría y que permita repartir las cargas en todo el elemento. Este tipo de procesamiento permite alcanzar mayor exactitud en los

Figura 1
Estructura Existente (CIV)



2.2 Datos Procesados

Para definir la resistencia a compresión del hormigón f'_c , se realiza ensayos de compresión de núcleos de hormigón [13], [14] y esclerómetro [15], en 14 elementos estructurales, obteniendo los valores promedios de la Tabla 1.

Tabla 1

Resistencia a la Compresión de los elementos estructurales

Resistencia adoptada	Unidad	Vigas y columnas	Muro	Losa de reacción
f'_c	[MPa]	24	21	36

En el caso del módulo de elasticidad E se trabaja con fórmulas aproximadas, características de los materiales del Ecuador, basándose en estudios nacionales [23], y en las recomendaciones que establece el ACI 318-19[12], la

misma que se trabaja en $[\text{kg}/\text{cm}^2]$ con la ecuación equivalente a $12500 * \sqrt{f'_c}$ y en $[\text{MPa}]$ con $3905 * \sqrt{f'_c}$ como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2

Módulo de Elasticidad de los elementos estructurales existentes

Módulo de elasticidad	Unidad	Vigas y columnas	Muro	Losa de reacción
E	[MPa]	18990,50	17763,98	23258,51

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo se realizan ensayos de: contenido de humedad [24], clasificación de suelos [25], límite líquido [26], límite plástico [26], índice de plasticidad [26], ensayos de

compresión simple [27] y triaxial UU S/SAT [16]. El esfuerzo admisible σ_{adm} se toma con un factor de seguridad de 3 [11] y el coeficiente de balasto de acuerdo con lo que recomienda Bowles [28] (ver Tabla 3).

Tabla 3

Información del Suelo

Parámetro	Unidad	Valor
Esfuerzo admisible	σ_{adm} [kN/m ²]	187,08
Coefficiente de balasto	K [kN/m ³]	2 244,45

La mampostería es de ladrillo, para la cual se considera un módulo de elasticidad E_m entre $350f'_m$ y $1000f'_m$ según Grijalva & Narváez [29] y el valor de f'_m se obtiene de la INEN 3049[10], ver Tabla 4. Estos valores se

emplean para la calibración del modelo [30] variando el módulo de elasticidad de la mampostería, para obtener un período aproximado al determinado en el ensayo de vibraciones ambientales [31] realizado en la estructura.

Tabla 4

Parámetros empleados para la mampostería

Parámetro		Unidad	Valor
Módulo de elasticidad	E_m	[MPa]	13 720
Resistencia a compresión del ladrillo	f'_m	[MPa]	13,72

2.3 Verificación de los elementos estructurales

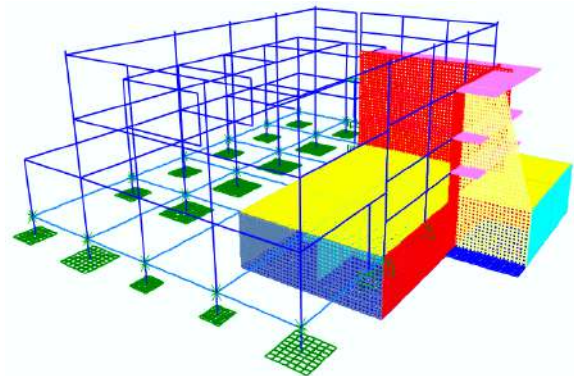
Se realizan 11 combinaciones de carga de acuerdo con lo que se establece en la NEC-15 [9] y ACI 318-19[12]. Además, de los modelos computacionales se realiza la verificación manual para corroborar los resultados provenientes de los análisis.

Para todos los elementos estructurales se constata el armado actual existente a partir de planos estructurales del año 1998. En las vigas se realiza la verificación a flexión y corte, y se comparan los resultados con las condiciones mínimas requeridas por el ACI 318-19[12]. Para las columnas se emplean diagramas de interacción para evaluar la capacidad a flexión y compresión, paso que se realiza para cada elemento existente. Además, se realiza la revisión del refuerzo transversal, confinamiento y capacidad a corte, acorde con lo que establece la normativa [11], [12].

Para la losa se verifica la demanda y capacidad actual a través de revisiones a flexión y corte. Además, se realiza el análisis de las dimensiones mínimas necesarias en las secciones para garantizar un comportamiento adecuado. La cimentación se evalúa con ayuda de dos programas computacionales, considerando las acciones resultantes en las columnas y con ayuda de resortes que simulen la interacción suelo-estructura para revisiones a: flexión, corte unidireccional y bidireccional, deformaciones y esfuerzos en el suelo como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Cimentaciones Analizadas (CIV)



2.4 Revisión del sistema de reacción

El sistema de reacción se encuentra modelado en el software computacional mediante elementos área tipo Shell, los cuales tienen un mallado dividido en cuadrados de 20 [cm] x 20 [cm], con la finalidad de facilitar la conexión con los demás elementos y optimizar el cálculo computacional. A continuación, en la Figura 3, se observa el sistema de reacción modelado.

Figura 3

Sistema de reacción modelado



Las combinaciones utilizadas para la revisión del sistema de reacción son 11, las cuales se toman de las recomendaciones del ACI 318-19 [12]. En este caso, la carga viva que actúa en el muro de reacción y losa de reacción es la fuerza del gato hidráulico y marco de carga, C_{SR} respectivamente.

2.5 Muro y losa de reacción

La revisión del muro y losa de reacción se realiza mediante la generación de varios modelos matemáticos, en los cuales se toman en cuenta: las cargas del gato hidráulico en el muro, las cargas del marco de carga en la losa, las diferentes ubicaciones en donde actuarán las cargas o fuerzas y el armado existente que se especifica en los

planos estructurales.

Las cargas del gato hidráulico y del marco de carga se distribuyen en el área tipo Shell de cada elemento estructural, de acuerdo con el mallado del modelo matemático y las dimensiones de las placas que se utilizan en ellos. Las dimensiones de las placas y las fuerzas aplicadas se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5

Dimensiones de las placas que se usan en la losa y muro de reacción y cargas aplicadas

Elemento estructural	Placas [cm]	Carga [kN]
Muro de reacción	20x20	981 y 1961
	30x30	
	70x70	
Losa de reacción	40x40	981
	30x30	

La ubicación de las placas en el muro de reacción Oeste y Norte son 9, las cuales se observan en la Figuras 4 y 5 (Anexo Fig. 6); mientras que para la losa de reacción son 28 posiciones, como se muestran en la Figura 7. (Anexo Fig. 7).

Figura 4

Ubicación de la placa 70 [cm] x 70 [cm] para la distribución de la carga en el muro de reacción Oeste y Norte respectivamente

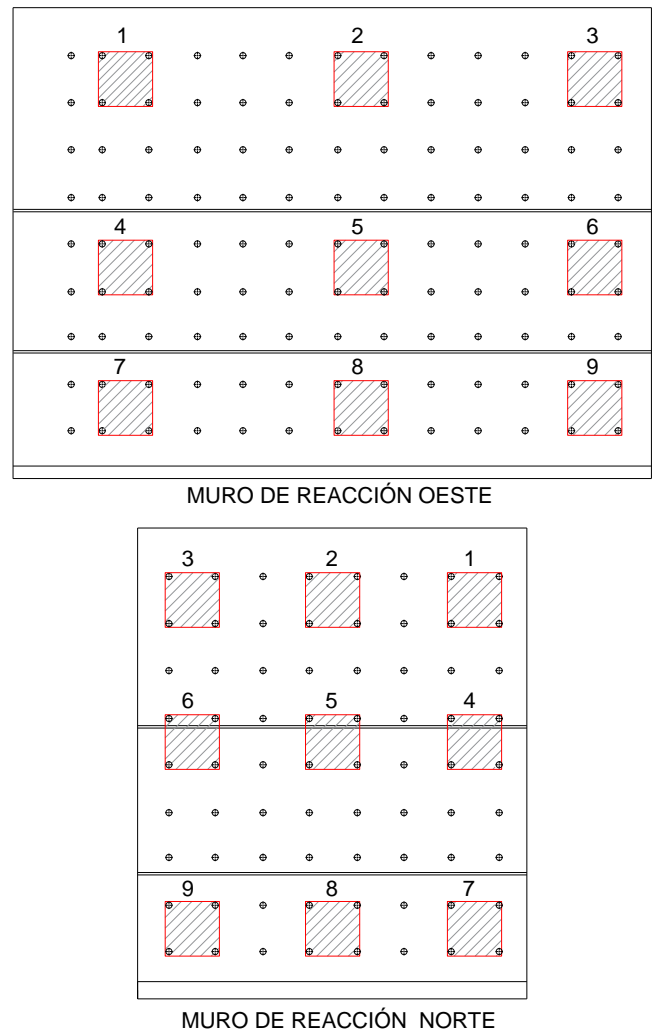
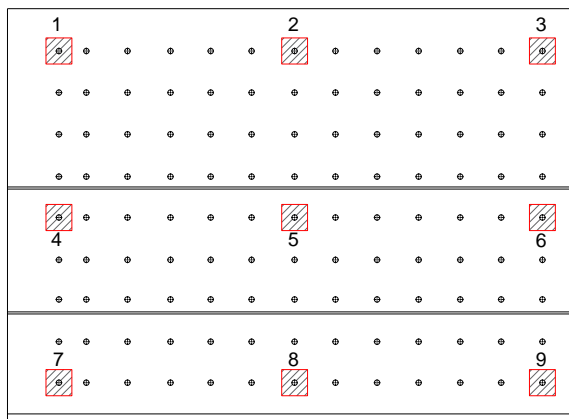
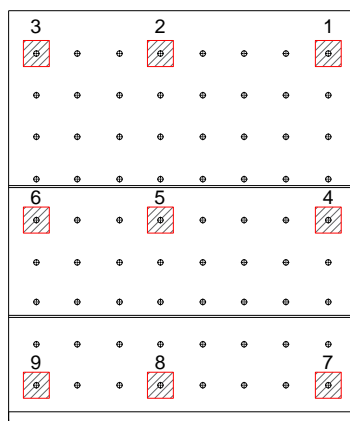


Figura 5

Ubicación de la placa 30 [cm] x 30 [cm] para la distribución de la carga en el muro de reacción Este y Norte respectivamente



MURO DE REACCIÓN OESTE



MURO DE REACCIÓN NORTE

La capacidad a flexión y corte del muro y losa de reacción se muestra en la Tabla 6, la misma que se obtiene considerando los aceros existentes en cada elemento de la estructura y mediante las ecuaciones 1 y 2, del ACI 318-19 [12]. Anexo Tabla 6.

$$\phi \cdot M_n = 0,9 * A_s * f_y \cdot \left(d - \frac{A_s \cdot f_y}{1,7 \cdot f'_c \cdot b} \right) \quad (1)$$

$$\phi V_n = \phi A_{cv} (0,17 \sqrt{f'_c} + \rho_t f_y); \quad \phi = 0,75 \quad (2).$$

Se revisa el muro y losa de reacción comparando la capacidad existente con la demanda obtenida en los diferentes modelos matemáticos realizados, y considerando la flexión y el cortante. A continuación, en la Tabla 7 y 8 se observa un ejemplo de los momentos y cortantes resultantes en los muros de reacción Norte y Oeste, en la ubicación 1 para cada tipo de placa. Anexo Tabla 7 y Tabla 8.

En la Tabla 9 se presenta un ejemplo de momentos y cortantes de la losa de reacción para las placas de 30 [cm] x 30 [cm] y 40 [cm] x 40 [cm] en la ubicación 1. Los resultados son los mismos para ambos casos, porque se tiene una distribución de cargas igual para ambas placas, debido al mallado realizado en el modelo matemático para el sistema de reacción. Anexo Tabla 9.

2.6 Contrafuertes

La revisión mediante el MEF de los contrafuertes se realizó con la ayuda del software estructural, para lo cual se tomó un elemento de los tres existentes y se lo separó de la estructura para evaluarlo de forma individual. Se le sometió de manera puntual a cargas laterales ubicadas a diferentes alturas como se muestra en la Figura 8. Anexo Fig. 8.

El contrafuerte es idealizado como una losa vertical, por lo cual, las consideraciones para la evaluación del elemento son tomadas del ACI 318-19[12] para el diseño de diafragmas estructurales sometidos a cargas laterales; en donde las fuerzas actúan en el plano. El análisis se realiza a los cabezales y pantalla del elemento estructural, tomando en cuenta la variación de su sección. En la Tabla 10 se presenta el refuerzo existente de dicho elemento estructural. Anexo Tabla 10.

2.7 Losa de Cimentación

La losa de cimentación se encuentra localizada a 3 [m] de profundidad, posee un espesor de 0,4 [m] y para su verificación se toma en cuenta su configuración, armado estructural y las propiedades del suelo. Para el análisis se utiliza el MEF considerando solo al elemento y a las cargas que actúan en él. De esta manera, se logra obtener los esfuerzos que actúan en el suelo como se observa en la Figura 9. Anexo Fig. 9, así como los momentos resultantes en ambas direcciones como se muestra en la Figura 10. Anexo Fig. 10.

Los resultados obtenidos del programa computacional corresponden a la demanda, la cual debe ser comparada con la capacidad existente, la misma que se presenta en la Tabla 11. Anexo Tabla 11.

2.8 Muros de Contención

Se evalúan los muros de contención situados en el contorno de la losa de reacción. Están conformados por muros externos de espesor de 0,20 [m] e internos de 0,40 [m]. Para el análisis, se los idealizó como muros en voladizo sometidos a presión horizontal, considerando diferentes solicitaciones de corte y flexión en la altura del muro.

El análisis se realiza manualmente, en el cual se toma en cuenta el caso de carga más crítico que incluye el empuje de tierra y el sismo. Este caso crítico se encuentra en función de la altura y usa un factor que considera la combinación de cargas estáticas y dinámicas.

2.9 Ampliación del muro de reacción

La ampliación del muro de reacción tiene como finalidad incrementar la cantidad de ensayos cuasi-estáticos que se

pueden realizar de manera simultánea en el CIV. El muro de reacción se ampliará en el pórtico 2 una longitud de 8,65 [m], medidos desde el final del muro norte existente, hasta el inicio de las gradas que dirigen al subsuelo, como se observa en la Figura 11. La geometría y características serán similares a las del muro existente, es decir: un ancho de 60 [cm], altura de 6 [m] desde el nivel del piso y pasadores distribuidos cada 60 [cm] en ambas direcciones, para tener continuidad con los agujeros del muro y losa de reacción actuales.

El nuevo muro de reacción poseerá una capacidad máxima de 490,33 [kN], para lo cual se incrementarán dos contrafuertes que se alinearán a los muros subterráneos ubicados bajo la losa de reacción. Además, se ampliará la losa de cimentación, muros de contención y losas del muro de reacción, de esta forma, la ampliación será igual al sistema de reacción existente, y la conexión se la realizará mediante una junta de construcción. Anexo Fig. 11.

2.10 Modelación del nuevo muro de reacción

La modelación del nuevo muro de reacción se realizó utilizando elementos área tipo Shell, con las mismas dimensiones del sistema de reacción existente. El modelo matemático se presenta en la Figura 12, en donde: la ampliación se muestra de color azul oscuro y los valores de resistencia a compresión del hormigón utilizados para la losa de reacción es de 36 [MPa] y para los demás elementos es de 28 [MPa]. Anexo Fig. 12.

2.11 Diseño del nuevo muro de reacción

El diseño del nuevo muro de reacción se realiza con el mismo procedimiento usado en el existente. Es decir que, en base al modelo matemático se encuentran los momentos y cortantes que resultan de someter al elemento estructural a cargas perpendiculares a su plano en diferentes posiciones. En este caso se usará la placa de 20 [cm] x 20 [cm] en las 4 posiciones más altas del nuevo muro de reacción, (5,4 [m] medidos desde el nivel del piso), con una fuerza máxima de 490 [kN], y tomando en cuenta las combinaciones de carga consideradas para la revisión del sistema de reacción existente.

A continuación, en la Tabla 12 se presenta los momentos y cortantes obtenidos en el modelo matemático, para cada ubicación. Anexo Tabla 12.

2.12 Diseño de la Ampliación de la nueva Infraestructura

La ampliación de la infraestructura se realiza con el fin de solucionar los problemas de demanda generados por la necesidad de espacio. Se incrementará un área aproximada de 400 [m²] conservando la alineación de la infraestructura existente y la distribución en altura como se observa en la

Figura 13.

2.13 Modelación de la Estructura

Se adopta un valor de resistencia para los elementos estructurales de 28[MPa]. Y en el caso de los elementos que conforman la losa de reacción, se utilizan los valores definidos anteriormente en la ampliación del muro de reacción.

Para las secciones de vigas, columnas, losa y cimentaciones se mantiene un armado similar al que tienen los elementos en la estructura actual. Se consideró el pre-dimensionamiento de forma que cumplan con los armados mínimos para cada chequeo establecido por normativa internacional y nacional [9], [12].

Para la definición y distribución de cargas se considera el uso de cada espacio; y al igual que en la estructura existente se hace referencia a la normativa NEC-15[9]. Se considera carga muerta, viva y sísmica para los diferentes niveles en oficinas y cubierta.

Las combinaciones contemplan las cargas definidas anteriormente, tomando el caso más crítico como la envolvente de las combinaciones. En el sistema de reacción se modifican las mismas para definir una carga viva que corresponde a la carga aplicada por los gatos hidráulicos y marco de carga C_{SR} . Anexo Fig. 13.

2.14 Análisis

Los dos análisis que se contemplan hacen referencia al análisis estático y dinámico modal espectral. El análisis estático se lo realiza considerando la estructura existente en conjunto con la ampliación del muro de reacción, y en el análisis dinámico considera únicamente la infraestructura ampliada como se evidencia en las Tablas 13 y 14.

Se comparan los resultados provenientes del cortante basal en las dos direcciones de cada análisis como se establece en la NEC-15[9], el mismo que indica que el $V_D > 85\%V_E$. Anexo Tabla 13 y Tabla 14.

2.15 Diseño de Elementos Estructurales

A partir del pre-diseño se realizan las revisiones con los valores del modelo computacional, y de acuerdo al elemento estructural.

Se mantienen armados similares a los encontrados en planos estructurales del año 1998, verificando los mismos mediante un pre-diseño en vigas, columnas, losa y cimentaciones de los nuevos elementos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Muro de reacción y losa de reacción

De acuerdo con la comparación realizada, entre la capacidad existente del muro de reacción y la obtenida mediante el software computacional, la máxima fuerza del gato hidráulico que se puede aplicar en el muro de reacción con las diferentes placas en las 9 ubicaciones se presenta en las Figuras 14 y 15. Anexo Fig. 14 y Fig. 15.

Los desplazamientos que se generan al aplicar las cargas máximas en dirección de la aplicación de la fuerza se observan en las Figuras 16 y 17. Anexo Fig. 16 y Fig. 17.

Para la losa de reacción se obtiene como resultado que la máxima fuerza que se puede aplicar en el elemento estructural para las placas de 30 [cm] x 30 [cm] y 40 [cm] x 40 [cm] es de 981 [kN] en todas las ubicaciones.

La máxima deflexión de la losa de reacción obtenida en el modelo matemático es 5,19 [mm], siendo inferior a la calculada de 12,5 [mm], la cual se determina tomando en cuenta los límites establecidos por el ACI 318-19[12] y asumiendo un factor de seguridad de 2.

3.2 Contrafuertes

En la Figura 18, se presentan las cargas máximas que puede soportar el contrafuerte para cada ubicación, en donde se aprecia que a medida que la sección del elemento estructural crece, las fuerzas también aumentan. Anexo Fig. 18.

3.3 Losa de Cimentación

La revisión de la losa de cimentación se realizó a flexión, obteniéndose los momentos máximos y mínimos para ambas direcciones, a través del programa computacional. Se evidencia que el armado actual le proporciona a la sección una mayor capacidad que la requerida.

También, se realizó una comprobación del esfuerzo admisible del suelo, en donde se obtiene un valor máximo de 84,04 [kN/m²], siendo menor al valor obtenido mediante los ensayos de suelos y cumpliendo con la revisión.

3.4 Muros de contención

De acuerdo con las máximas solicitaciones de momento y corte para los muros de contención internos y externos que rodean la losa de reacción, se obtiene una demanda similar que no sobrepasa a la capacidad existente. Por lo tanto, las secciones colocadas son las adecuadas para dichas solicitaciones como se observa en la Tabla 15. De igual forma, el espesor de los elementos estructurales cumple con el chequeo realizado, comprobándose que es capaz de resistir las solicitaciones a flexión. Anexo Tabla 15.

3.5 Ampliación del muro de reacción

La demanda resultante de los modelos matemáticos se compara con la capacidad obtenida del armado del muro de reacción existente; de esta manera se observa que dicho armado es suficiente para cubrir las solicitaciones del nuevo muro de reacción, en donde los resultados a flexión y corte se presentan en la Tabla 16 y Tabla 17

respectivamente. Anexo Tabla 16 y Tabla 17.

Finalmente, el armado de la pantalla del nuevo muro de reacción es igual al existente, es decir, Ø18 @ 15 [cm] para acero vertical y horizontal. De igual forma, los armados de los demás elementos estructurales que conforman el sistema de reacción, como son: los contrafuertes, losa de cimentación y muros de contención, serán iguales a los existentes. En la revisión de estos elementos, se comprueba que tienen la capacidad suficiente para cubrir la demanda de diseño de 490 [kN] del nuevo muro de reacción, y en la Tabla 18 se presenta un resumen de los armados de los nuevos elementos estructurales. Anexo Tabla 18.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante la modelación matemática utilizando el método de elementos finitos (MEF) resulta ser efectivo, real e incluso más conservador, en comparación con algunos cálculos de control realizados a mano.

La discretización del modelo en elementos finitos permitió visualizar los esfuerzos puntuales tanto en la losa como el en muro de reacción, facilitando el análisis y la verificación de capacidad frente a la demanda.

Pese a la demanda computacional del programa utilizado para el análisis por el método de elementos finitos (MEF), los resultados obtenidos son relevantes y necesarios para evaluar estructuras y elementos que estarán sometidos a cargas dinámicas y cuasi-estáticas.

Los elementos estructurales del CIV como vigas, columnas, losas y cimentaciones tienen la suficiente capacidad para resistir las solicitaciones a las cuales se encuentran sometidos, incluso se puede evidenciar que se encuentran sobredimensionados ya que la demanda es pequeña.

La mayoría de los elementos estructurales analizados, incluyendo los que conforman el sistema de reacción, se encuentran armados con la cuantía mínima especificada por las normas vigentes, ya que el área de acero obtenida a través de la demanda es menor a la mínima calculada.

El muro de reacción Oeste tiene suficiente capacidad para resistir cargas del gato hidráulico de 981 [kN] para las placas de 20x20 [cm], 30x30 [cm] y 70x70 [cm]; incluso con la placa más grande, en las zonas centrales, el elemento estructural soporta fuerzas de hasta 1962 [kN].

El muro de reacción Norte, tiene menor capacidad que el Oeste, ya que cuenta con un solo contrafuerte, en donde la máxima carga del gato hidráulico que puede resistir es 981 [kN] para las tres placas en la zona central y la cercana a la unión con el otro muro. Mientras que, en la zona en donde termina el elemento estructural, al lado del contrafuerte,

soporta menos fuerza debido a que en esa parte el muro se asemeja a un volado.

Se evidencia que en las posiciones analizadas en la losa de reacción se tiene un comportamiento adecuado a flexión y a corte, para la carga analizada del gato hidráulico de 981 [kN] y para las placas de 30x30[cm] y 40x40[cm].

Los contrafuertes fueron revisados para cargas laterales, se evidencia que la fuerza que resiste en la parte más alta del elemento estructural es de 587 [kN] y a medida que la altura disminuye y la sección crece, la carga aumenta, llegando a soportar 1030 [kN].

La ampliación del muro de reacción se realizó manteniendo la configuración del sistema de reacción existente, en donde, después de revisar los elementos estructurales como contrafuertes, muros de contención, losa de cimentación, losa y muro de reacción. Se comprobó que la estructura es capaz de resistir la carga de diseño para la ampliación, la cual es de 490 [kN] y se decide mantener el mismo armado para los nuevos elementos.

Los nuevos contrafuertes se ubican alineados a los muros que se encuentran bajo la losa de reacción para aportar rigidez al sistema de reacción. De igual manera, los muros de contención en conjunto con la losa de reacción y contrafuertes forman un sistema tipo cajón que le brindan resistencia y rigidez.

Se recomienda que los ensayos que requieran una carga mayor a 981 [t] se realicen en el muro Oeste, mientras que aquellos que demanden una aplicación de fuerzas más pequeñas se hagan en el muro Norte.

En el modelo se recomienda realizar un mallado uniforme evitando cambios bruscos de geometría para una mejor distribución de las cargas, minimizar errores por convergencia, y obtener un análisis más real.

REFERENCIAS

[1] C. G. Ugalde, (2009). "Diseño arquitectónico del laboratorio de estructuras y diseño estructural del muro de reacción de la facultad de ingeniería U.A.Q." Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro.

[2] MIDUVI. (2013). Política habitacional y servicios de agua y saneamiento, período 2009-2025.

[3] CITEEC-Udc. (2017). Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil de la Universidad da Coruña Recuperado de: <https://www.udc.es/citeec/construccion.html> [febrero, 2020].

[4] UNAM, I. D. (2021). Instituto de Ingeniería UNAM. Obtenido de Laboratorio de estructuras y materiales: <http://www.ii.unam.mx>

[5] Orientación Profesional - Posgrados y Pregrados. (2020). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito inaugura moderno edificio de laboratorios de estructuras y materiales - Noticias. Recuperado de: <https://orientacion.universia.net.co>

[6] Bernal, J. (2020). Modelos Estructurales. Laboratorointegrado.uniandes.edu.co. Recuperado de: <https://laboratoriointegrado.uniandes.edu.co>

[7] EPN, y FICA. (2014). Centro de Investigación de la Vivienda. Recuperado de Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Obtenido de: <https://fica.epn.edu.ec>

[8] E. Ruiz, y C. Arias. (2019). "Modelación por el Método de Elementos Finitos (MEF), mediante el Software Ansys del Elemento Placa". Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[9] Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). NEC-SE-DS-Peligro Sísmico-Diseño Sismo Resistente. Quito, Ecuador: NEC.

[10] INEN, S. E. (2019). "Ladrillos cerámicos. Parte 3: Unidades de mampostería no estructural. Requisitos". Quito: NTE INEN 3049-3.

[11] ASCE. (2017). "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (41-17)". Washington DC, Estados Unidos: American Society of Civil Engineers.

[12] American Concrete Institute. (2014). "Requisitos de Reglamento para el Concreto Estructural (ACI 318S-14) (Vol. 22)". Estados Unidos: ACI.

[13] ASTM C39. (2018). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". United States: ASTM International.

[14] ASTM C42. (2018). "Test Method of Obtaining and Testing Driller Cores and Sawed Beams of Concrete". United States: ASTM International.

[15] ASTM C-805. (2018). "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete". United States: ASTM International.

[16] ASTM D2850-15. (2015). "Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils". United States: ASTM International.

[17] J. Álvarez. (2020). "Análisis Aplicativo del Método de los Elementos Finitos en un Campo Estático-Lineal e

- Introducción a la no Linealidad”. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [18] J. I. Aravena. (2021). “Análisis y diseño de un paraguas invertido en hormigón armado mediante elementos finitos [Universidad Andrés Bello]”. Obtenido de: <https://repositorio.unab.cl>
- [19] D. A. Turcios. (2020). “Comparación de diseño estructural para cimentaciones superficiales utilizando el método rígido convencional y el método Winkler por elementos finitos [Instituto Tecnológico De Costa Rica]”. Obtenido de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr>
- [20] J. Casanova. (2018). “Cuaderno de Mecánica Computacional de Sólidos”. Obtenido de: <https://riunet.upv.es>
- [21] A. F. Alanoca. (2019). “Método Algorítmico Matemático de Elementos Finitos para construir Losas de Estructuras diversas, con Resistencia Específica [Universidad Nacional Federico Villareal]”. Obtenido de: <https://repositorio.unfv.edu.pe>
- [22] E. Oñate. (2009). “Structural Analysis with the Finite Element Method-Linear Statics”. España: Springer.
- [23] H. Cabrera. (2014). “Módulo de Elasticidad de Hormigones de Peso Normal empleados en el Ecuador f’c: 21, 24, 28, 35 Mpa”. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [24] ASTM D2216-10, (2010). “Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [25] ASTM D6913 / D6913M-17, (2017). “Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis”, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [26] ASTM D4318-17e1, (2017). “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [27] ASTM D2166 / D2166M-16, (2016). “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [28] Bowles, J. (1996). Foundation Analysis and Design. New York: McGraw-Hill.
- [29] L. Grijalva & H. Narváez. (2018). “Elaboración de Curvas de Fragilidad para Ensayos Experimentales realizados sobre Mamposterías de Bloques de Concreto y Ladrillos en Quito”. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [30] M. Durán Bolaños. (2018). “Calibración de modelos estructurales y estudio del comportamiento dinámico para puentes de vigas de acero compuestas y continuas de 3 tramos”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- [31] R. Godfrey Montero. (2018). “Identificación de modos de torsión de tres edificios de concreto reforzado empleando la medición de vibraciones ambientales y el análisis espectral”. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Anexos

Tablas

Tabla 6

Capacidad del Muro y Losa de Reacción

Elemento estructural	Flexión [N-m/m]	Corte [N/m]
Muro de reacción	333,10	1386,11
Losa de reacción	882,00	1164,14

Tabla 7

Resultantes de momentos y cortantes del muro de reacción norte en la ubicación 1

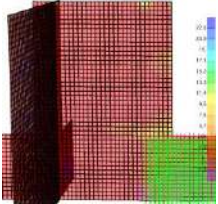
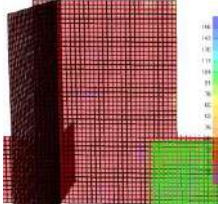
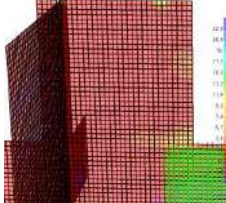
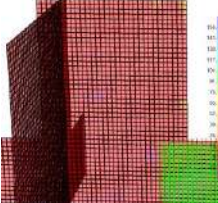
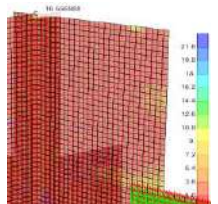
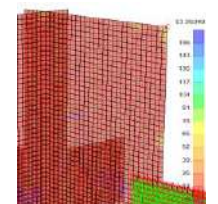
Placa	Carga [kN]	Momento	Cortante
70x70	539		
30x30	441		
20x20	441		

Tabla 8.

Resultantes de momentos y cortantes del muro de reacción Oeste en la ubicación 1

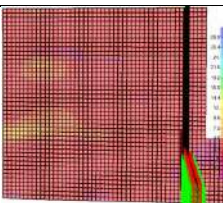
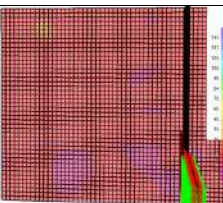
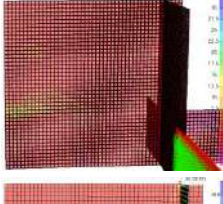
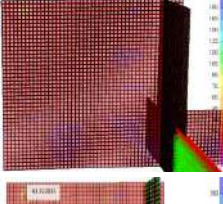
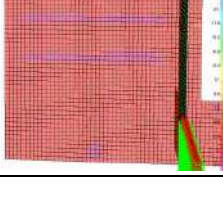
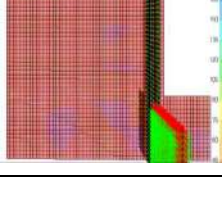
Placa	Carga [kN]	Momento	Cortante
70x70	981		
30x30	981		
20x20	981		

Tabla 9

Resultantes de momentos y cortantes de la losa de reacción en la ubicación 1

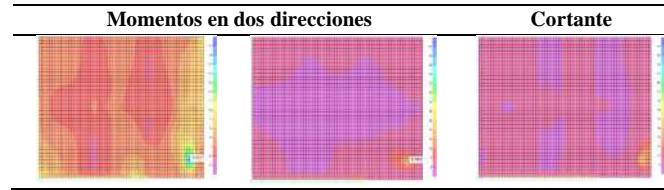


Tabla 10

Refuerzo existente en el contrafuerte

Elemento	Refuerzo longitudinal [cm ²]	Refuerzo transversal [cm ²]	Cuantía ρ_t y ρ_l
Cabezal externo	58,90	3,14	-
Cabezal interno	66,54	1,57	-
Pantalla	-	-	0,002

Tabla 11

Capacidad existente de la losa de cimentación

σ_{adm} [kN/m ²]	A_{sup} [cm ²]	A_{sup_r} ef [cm ²]	A_{inf} [cm ²]	A_{inf_r} ef [cm ²]
187,08	1,54	1,54	2,01	2,01
A_{sup} : área de acero superior		A_{inf} : área de acero inferior		
A_{sup_ref} : área de refuerzo superior		A_{inf_ref} : área de refuerzo inferior		

Tabla 12

Momentos y cortantes del nuevo muro de reacción (C_{SR})

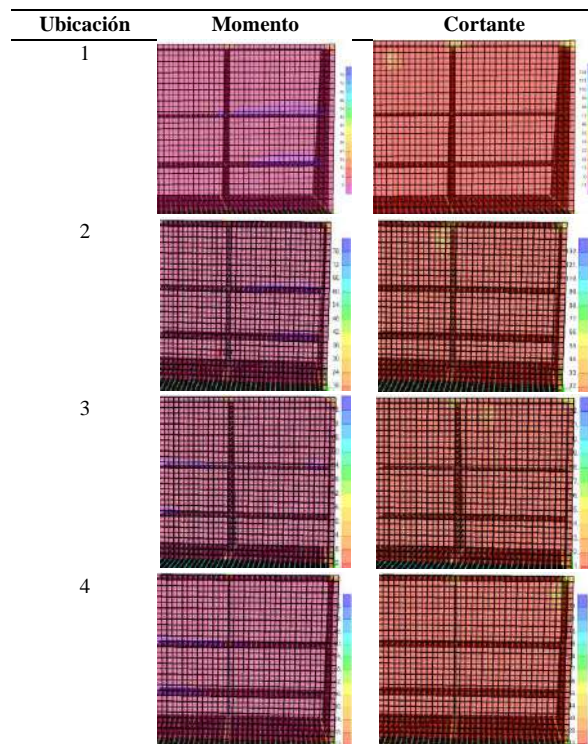


Tabla 13

Comparación Cortante Basal Análisis Estático y Dinámico Primer Caso

Dirección	Análisis		%V D/E	Cumplimiento
	Estático [kN]	Dinámico [kN]		$V_D > 85\%V_E$
X	3359,63	3514,58	104,61	OK
Y	3359,63	4792,54	142,65	OK

Tabla 14

Comparación Cortante Basal Análisis Estático y Dinámico Segundo Caso

Dirección	Análisis		%V D/E	Cumplimiento
	Estático [kN]	Dinámico [kN]		$V_D > 85\%V_E$
X	666,13	568,44	85,34	OK
Y	666,13	574,45	86,24	OK

Tabla 15

Capacidad y demanda de los muros de contención

Acero en pantalla	Capacidad	Demanda	Cumplimiento
As_{min}	Ø10@20[cm] o Ø14@10[cm]	Ø10@20[cm]	OK
As_{ret_temp}	Ø10@20[cm]	Ø10@20[cm]	OK

Tabla 16

Resultados a flexión del nuevo muro de reacción con placa 20x20 [cm]

Carga [kN]	Ubicación	Momentos [kN-m/m]		Capacidad	Cumplimiento
		Demanda			
		Máximo	Mínimo		
490	1	335,58	-332,25	336,47	OK
490	2	331,8	-332,25	336,47	OK
490	3	335,78	-332,25	336,47	OK
490	4	333,72	-335	336,47	OK

Tabla 17

Resultados a flexión del nuevo muro de reacción con placa 20x20 [cm]

Carga [kN]	Ubicación	Cortantes [kN/m]		Capacidad	Cumplimiento
		Demanda			
		Máximo	Mínimo		
490	1	614,98	-679,01	1439,52	OK
490	2	644,69	-682,05	1439,52	OK
490	3	720,69	-691,66	1439,52	OK
490	4	674,21	-643,51	1439,52	OK

Tabla 18

Resumen del armado de los nuevos elementos del sistema de reacción

Elemento	Armado estructural			
Pantalla del muro de reacción	Acero horizontal	Ø18 @ 15 [cm]		
	Acero vertical	Ø18 @ 15 [cm]		
Contrafuerte	Acero horizontal	Ø10 @ 20 [cm]		
	Acero vertical	Ø10 @ 20 [cm]		
	Cabezal externo	Refuerzo longitudinal	12Ø25	
		Refuerzo transversal	Ø10 @ 10 [cm]	
Cabezal interno	Refuerzo longitudinal	12Ø25 + 3Ø18		
	Refuerzo transversal	Ø10 @ 30 [cm]		
Losa de reacción	Acero longitudinal	Ø25 @ 15 [cm]		
	Acero transversal	Ø25 @ 15 [cm]		
Losa de cimentación	Dirección X	Acero superior	Ø14 @ 20 [cm]	
		Acero inferior	Ø16 @ 20 [cm]	
	Dirección Y	Acero superior	Ø14 @ 20 [cm]	
		Acero inferior	Ø16 @ 20 [cm]	
Muros de contención	Acero horizontal	Ø10 @ 20 [cm]		
	Acero vertical	Ø18 @ 20 [cm]		

Figuras

Figura 6

Ubicación de la placa 20 [cm] x 20 [cm] para la distribución de la carga en el muro de reacción Oeste y Norte respectivamente

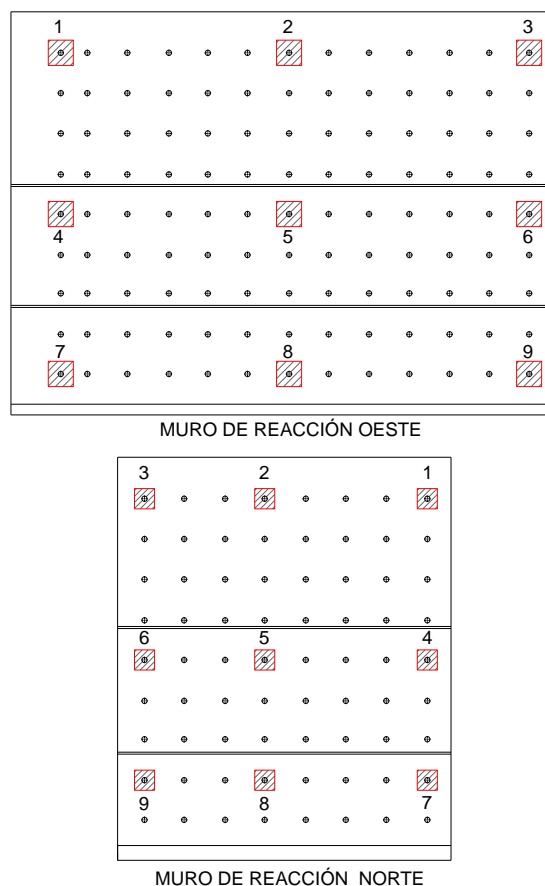


Figura 7

Ubicaciones para las placas de 30x30[cm] y 40x40[cm] de la losa de reacción

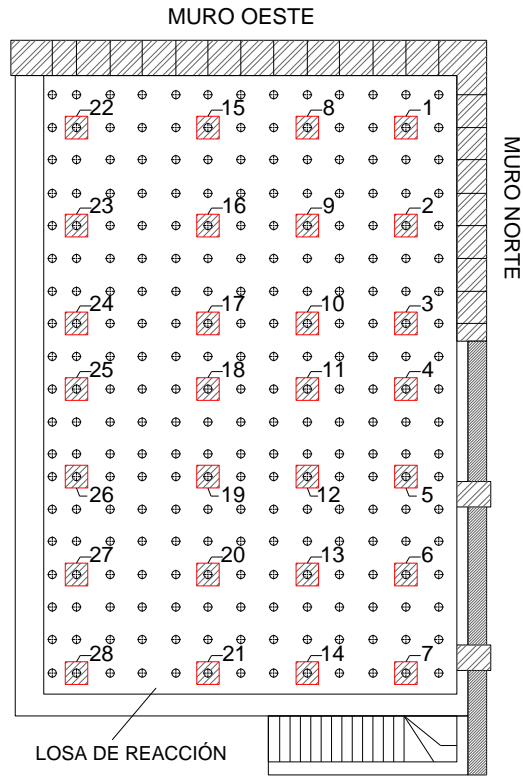


Figura 8

Ubicaciones de las cargas en el contrafuerte

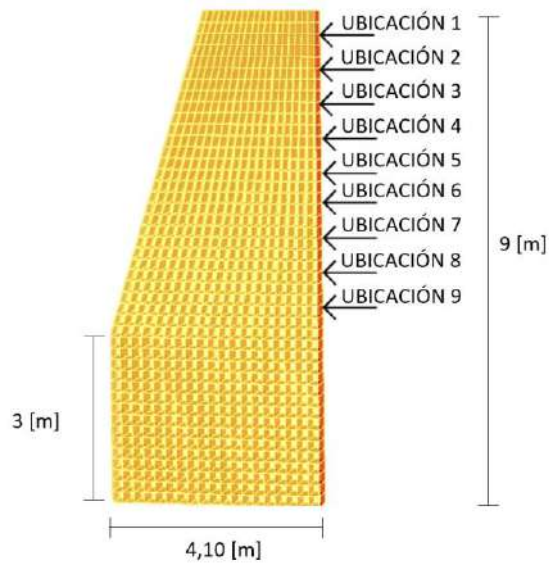


Figura 9

Esfuerzos del suelo debido a la losa de cimentación ($D+C_{SR}$)

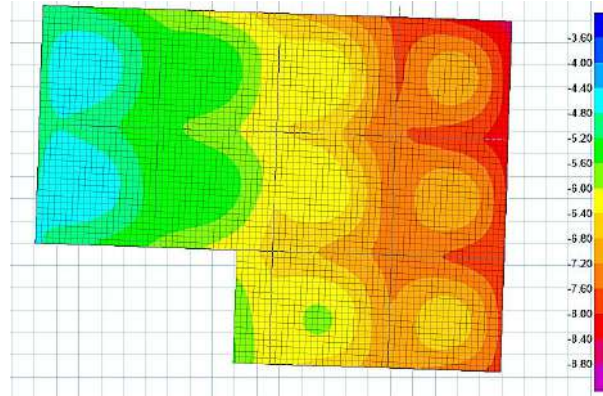


Figura 10

Momentos actuantes en las dos direcciones en la losa de cimentación ($D+C_{SR}$)

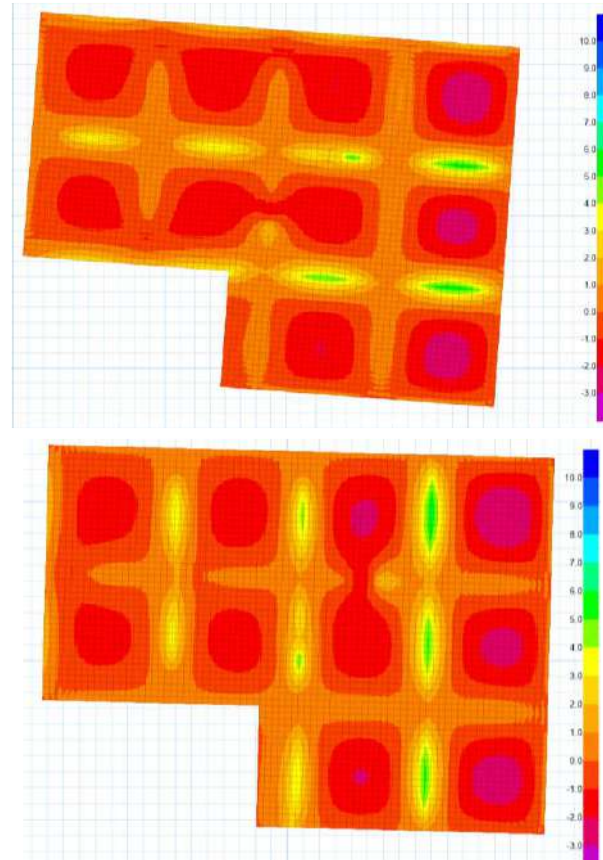


Figura 11

Vista en planta de la ampliación del sistema de reacción

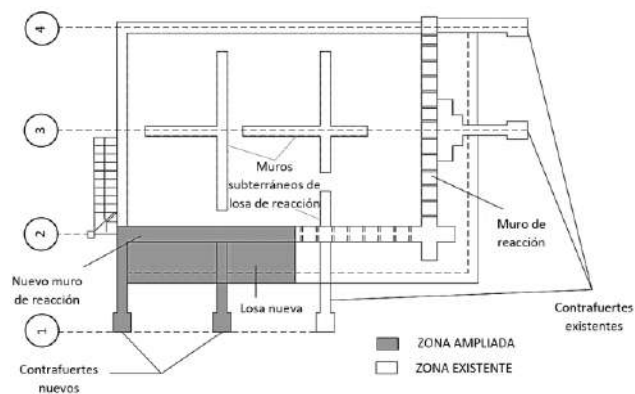


Figura 12
Ampliación del sistema de reacción

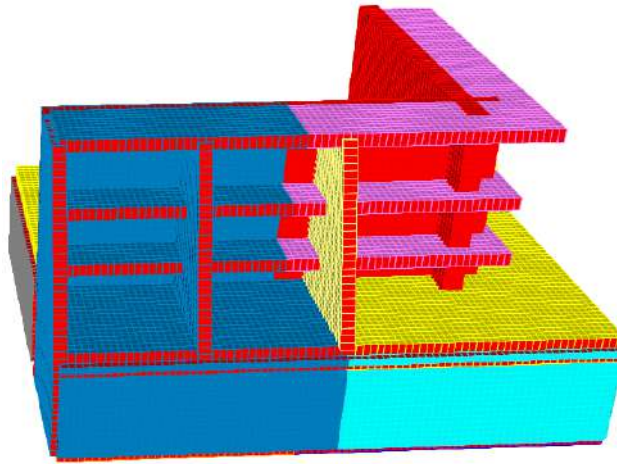


Figura 13
Ampliación sistema de reacción y nueva infraestructura

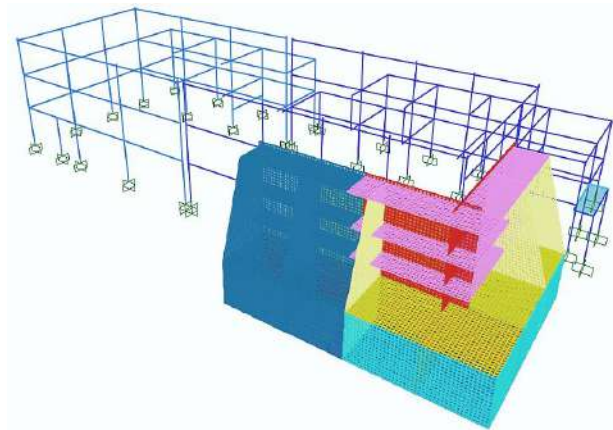


Figura 14
Fuerza máxima recomendada para el Muro Norte

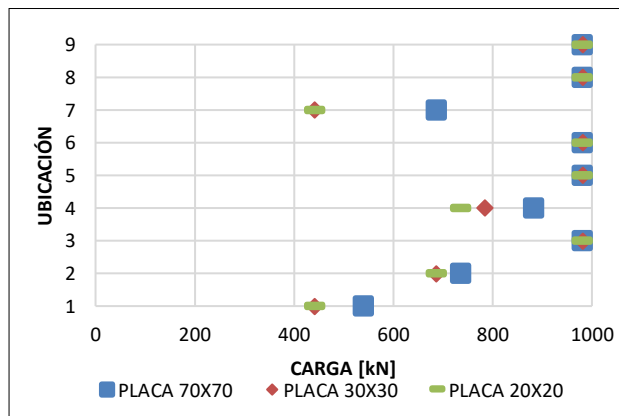


Figura 15

Fuerza máxima recomendada para el Muro Oeste

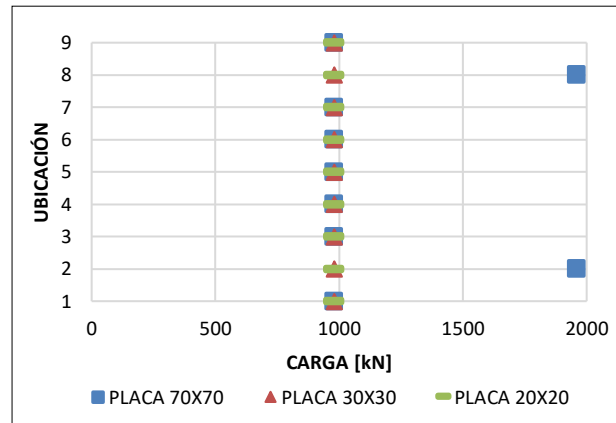


Figura 16

Desplazamientos del Muro Norte

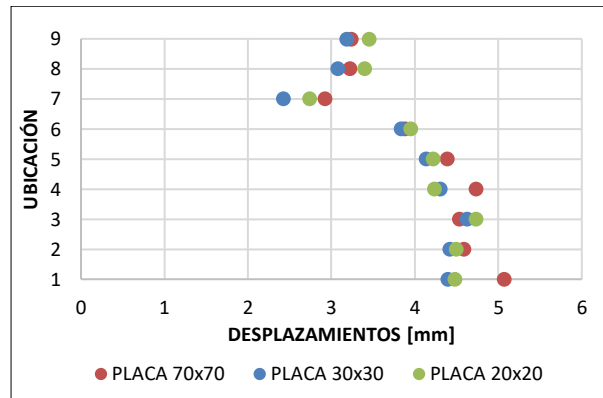


Figura 17

Desplazamientos del Muro Oeste

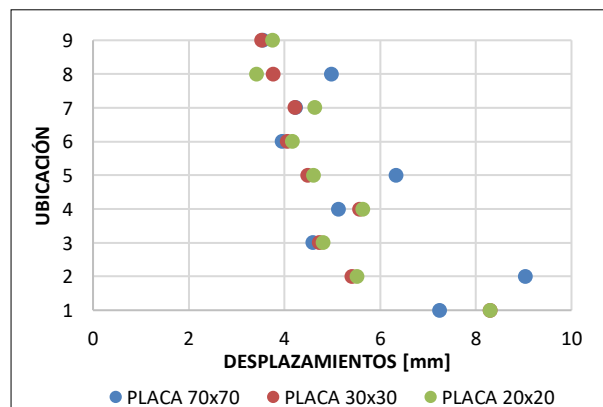
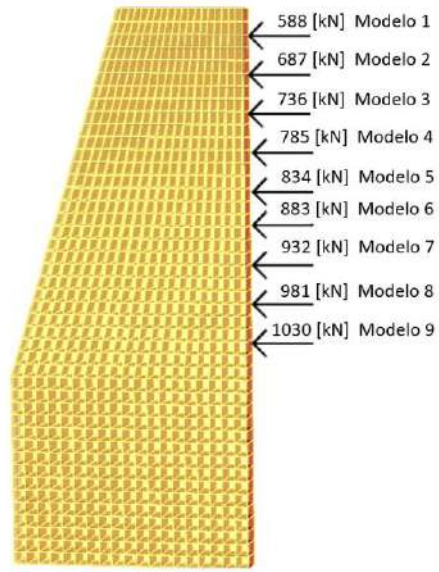


Figura 18

Fuerzas recomendadas para el contrafuerte





REVISTA INGENIO

Análisis de Vulnerabilidades en Equipos de TO de Grado Médico en el Hospital de SOLCA Núcleo de Quito

Vulnerability Analysis in Medical Grade OT Equipment at the SOLCA Nucleus Hospital in Quito

Gerardo Iván Cajamarca Méndez [1](#) | [ID](#) Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui (Ecuador)

Mario Giovanni Ron Gavi [2](#) | [ID](#) Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui (Ecuador)

María Gabriela Vera [3](#) | [ID](#) Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui (Ecuador)

María Karina Alvarado Figueroa [4](#) | [ID](#) Instituto Superior Tecnológico Rumiñahui (Ecuador)

Bryan Alexander Cajamarca Albán [5](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 13/10/2023

Recepción tras revisión: 13/11/2023

Aprobación: 4/12/2023

Publicación: 31/1/2024

PALABRAS CLAVE

Equipos OT, SOLCA, salud, Seguridad de la información, Tenable OT, vulnerabilidades, riesgo informático

ARTICLE HISTORY

Received: 13/10/2023

Received after revision: 13/11/2023

Approved: 4/12/2023

Accepted: 31/1/2024

KEY WORDS

OT Equipment, SOLCA, health, information security, Tenable OT, Vulnerabilities, informatics risk

RESUMEN

La importancia de la seguridad de la información que contienen los equipos médicos de un Sistema Hospitalario (SH) es primordial para el seguimiento del estado de salud del paciente. El SH se abastece de equipos cada vez más avanzados tecnológicamente por el alcance de los resultados, los mismos están conectados a la red del SH, si no hay un control adecuado en la administración pueden ser vulnerables ante ataques cibernéticos e impedir el normal funcionamiento de la red hospitalaria y comprometer el historial médico de un paciente, poniendo en riesgo su salud. Nace el interés médico, en poner bajo protección, los equipos OT (tecnología operativa), equipamiento que apoya los procesos industriales y críticos en tiempo real de un SH, para precautelar la información de un paciente. El Hospital Solca Quito, realizará un análisis de vulnerabilidades bajo la herramienta Tenable OT, obteniendo la identificación de los activos, los riesgos y acciones inmediatas, lo que permitirá trabajar de manera segura.

ABSTRACT

The importance of the information security contained in the medical equipment of a Hospital System (HS) is crucial for monitoring the patient's health status. The HS relies on increasingly technologically advanced equipment due to the scope of the results; these are connected to the HS network. Without proper control in administration, they can be vulnerable to cyberattacks, disrupting the normal functioning of the hospital network and compromising a patient's medical history, endangering their health. The medical interest arises in protecting the Operational Technology (OT) equipment, which supports real-time industrial and critical processes within an HS, in order to safeguard patient information. Hospital Solca Quito will conduct a vulnerability analysis using the Tenable OT tool, identifying assets, risks, and immediate actions, enabling working in a secure way.

1. INTRODUCCIÓN

En la era digital actual, la tecnología ha revolucionado la industria de la atención médica de manera impresionante. Desde la gestión de registros de pacientes hasta los dispositivos médicos conectados a Internet, los avances tecnológicos han mejorado la eficiencia y la calidad de la atención médica [1]. Sin embargo, esta interconexión también ha traído consigo un riesgo creciente: la vulnerabilidad de los datos y sistemas médicos ante amenazas cibernéticas. La información de salud es altamente sensible y privada. Incluye datos médicos confidenciales, historiales de tratamiento y diagnóstico, información de seguros y datos personales. Un ciberataque

exitoso podría exponer estos datos a manos no autorizadas, lo que puede tener consecuencias devastadoras para la privacidad y la dignidad de los pacientes. La pérdida de confidencialidad en la atención médica puede llevar a la discriminación, el robo de identidad y la pérdida de confianza en los profesionales de la salud[2]. La interrupción de los servicios médicos debido a ataques cibernéticos puede tener consecuencias graves. Los sistemas hospitalarios, dispositivos médicos y registros electrónicos son vitales para la atención médica moderna. Un ataque exitoso que inmovilice estos sistemas podría poner en riesgo la vida de los pacientes y causar el caos en

los entornos de atención médica [3].

Los dispositivos médicos, como marcapasos y bombas de insulina, ahora están conectados a la red para monitoreo y ajuste remoto, estos dispositivos son objetivos potenciales para ataques cibernéticos. Un acceso no autorizado a estos dispositivos podría causar daño físico real a los pacientes. La ciberseguridad adecuada es esencial para proteger la salud y la seguridad de los pacientes que dependen de estos dispositivos. Las regulaciones, como la Ley de Portabilidad y Responsabilidad del Seguro de Salud (HIPAA) en los Estados Unidos, establecen estándares estrictos para la protección de la información de salud. El incumplimiento de estas regulaciones puede resultar en multas significativas y daño a la reputación de las organizaciones de atención médica [4]. La ciberseguridad efectiva es esencial para cumplir con estas regulaciones y evitar consecuencias legales y financieras adversas.

La formación de profesionales de la salud y el personal administrativo en ciberseguridad es esencial, estos son el eslabón más débil en la cadena de seguridad. La capacitación adecuada puede ayudar a prevenir ataques de ingeniería social y mejorar la seguridad en general. Por ello, la ciberseguridad en entornos médicos no es un lujo; es una necesidad crítica. La integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información médica son fundamentales para la atención de calidad y la protección de la privacidad del paciente [5]. La interrupción de los servicios médicos y el daño a dispositivos médicos conectados a Internet pueden tener consecuencias mortales. Es imperativo que las organizaciones de atención médica inviertan en ciberseguridad, implementen prácticas sólidas y fomenten la educación y la conciencia en este ámbito. La seguridad cibernética y la atención médica están inextricablemente entrelazadas en la sociedad moderna, y solo a través de una protección sólida se pueden garantizar los beneficios continuos de la tecnología en la atención médica.

En Ecuador el Hospital de SOLCA (Sociedad de Lucha contra el cáncer), es una entidad de salud que se dedica a controlar o mitigar las consecuencias de un tumor en el cuerpo humano y con esto dar una mejor calidad de vida al paciente; para este fin adquiere equipos OT médicos de avanzada tecnología, dispositivos que se alimentan de los datos que arroja el estado de salud de un paciente [6]. Varios son los procedimientos que se realizan para estabilizar la salud de un paciente con cáncer, y esto conlleva a que es una enfermedad costosa económicamente, de mucha paciencia y voluntad.

En la cama de un paciente puede haber varios equipos OT médicos emitiendo datos de monitorización continua, "Como resultado, este típico entorno sanitario moderno debe soportar decenas de miles de equipos OT que se conectan a la red" del Sistema Hospitalario (SH) [7]. Administrar la seguridad de un SH, es todo un reto pues no solo debe velar por la protección de los datos a nivel

empresarial sino también asegurar los datos de los equipos OT de línea médica y sus redes.

Los equipos OT de línea médica (como un escáner de resonancia magnética) se deben al mantenimiento y funcionalidad del fabricante, y los equipos empresariales (como un computador de escritorio) al Departamento de informática del SH. Pese a estas diferencias, el SH debe acoplarse a los requisitos que solicite el dispositivo médico para su correcto funcionamiento y el Departamento de informática deberá implementar lo necesario para que estos equipos médicos trabajen en conjunto dentro de la red con su equipo empresarial.

La Seguridad informática, se especializa en proteger al Sistema conectado en red de los ataques cibernéticos abarcando dos conceptos la seguridad física y lógica de los dispositivos, ambas custodian los datos de accesos no autorizados hacia un sistema informático [8]. Hay que aceptar el hecho de que todo sistema de información es quebrantable, lo que indica que incluso un Hospital puede ser severamente atacado en su red, el mismo que dispone de varios equipos OT de línea médica de diferentes fabricantes y no todos contienen la seguridad apropiada para proteger la información que se almacena en su software, en ciertos casos se trabaja aún con equipos médicos ya obsoletos sin ningún tipo de seguridad que fácilmente pueden ser vulnerados [9].

Varios han sido los ataques cibernéticos a nivel mundial en distintos SH. Sin ir tan atrás en el tiempo, en el 2020 cuando apareció la infección por COVID-19, aprovechando el caos que esta enfermedad trajo a varios países, fue atacada España por un ransomware "Newalquer" que enviaba correos electrónicos al personal sanitario camuflado con asunto del COVID-19 para ingresar al SH, inmovilizarlo y por último pedir dinero a cambio de devolver la información.

Al inicio de la pandemia en República Checa, un ransomware inactivó los equipos OT de línea médica del Hospital Universitario, perjudicando al paciente y al personal médico en intervenciones quirúrgicas y demás situaciones que atentaban contra la salud. Algo parecido sucedió en Estados Unidos, que por medio de un ciberataque quisieron causar lentitud en la funcionalidad de los equipos informáticos al Departamento de Salud y Servicios Humanos, pero no lo lograron. De igual manera en el Reino Unido, un ransomware WannaCry en el 2017 produjo un ataque a varias instituciones sanitarias en las que se solicitaba un rescate económico por el acceso al SH, el personal médico se vio en la necesidad de apagar el sistema informático junto con los equipos OT médicos [9]. Ante estos ataques a nivel mundial, se realizó un proyecto de revisión del alcance de los ciberataques contra el SH, lo que sirvió para varias reuniones, acuerdos y soluciones por un equipo con diversas disciplinas de profesionales, de tantos encuentros suscitados, resulta el tema de ciberseguridad en el SH; esto sucedió en el año 2018 dentro del foro bianual de salud de Ginebra, teniendo como fin

asegurar el ciclo de vida del equipo, mediante la identificación de los activos en caso de riesgo, capacitación a los usuarios, localización de vulnerabilidades, restricciones de accesos y control de privilegios administrativos, presentación de una línea de defensa ante un ataque y un plan de continuidad después del incidente, para que la ciberseguridad logre su objetivo en el entorno sanitario tanto el personal fabricante como el personal del SH deben mantener una buena comunicación para acrecentar la resistencia ante un ataque cibernético. [10]

La investigación se enfoca en un análisis de las vulnerabilidades que podrían comprometer la seguridad del equipamiento médico del Hospital de SOLCA Núcleo de Quito, el cual se suma a precautelar los activos e implementar barreras de defensa ante las posibles vulnerabilidades existentes en los equipos OT de grado médico, para el fin se realizará un análisis con la ayuda de la aplicación TENABLE TO, esta herramienta se presta para la seguridad del Internet de las cosas mediante el escaneo a toda la red en la que se obtendrán las vulnerabilidades de los equipos OT, los accesos no autorizados a sus datos y los riesgos humanos a los que se

enfrentan [11].

Materiales

El cuadrante de Gartner permite evaluar equipos de la Tecnología Operativa (OT). Es una metodología que se utiliza principalmente para evaluar proveedores y soluciones en diversas áreas de tecnología de la información (TI), pero no se utiliza de manera común para evaluar equipos de OT en sí.

La OT se relaciona principalmente con sistemas y equipos utilizados en el sector empresarial e incluso equipos médicos. Para llevar una gestión de control de seguridad en equipos OT de grado médico, se debe tener claro que la línea de seguridad es compleja porque se va a tratar con equipos de diferentes fabricantes a nivel industrial y cada uno de ellos ha implementado un tipo de seguridad de acorde a sus intereses y alcances, esta forma de operar conlleva a una alta demanda de vulnerabilidades y costos operativos, por esta razón se implementan nuevas herramientas que permiten dar un seguimiento de seguridad de la información y del estado del equipo OT de cualquier fabricante. A continuación, un cuadro comparativo entre ambos equipos [7].

Tabla 1

Diferencias entre equipos OT de línea médica y empresariales

Funcionamiento	Equipo Médico Ot	Equipo Empresarial
Inicio de Sesión en la red	Registro como dispositivo médico	Registrado como dispositivo empresarial
Número de serie	Es el mismo que el del fabricante del equipo médico	Es el mismo que el del fabricante del equipo empresarial
Credenciales de usuario	Es un médico autorizado capacitado	Personal empresarial autorizado
Control/Propiedad del dispositivo	Departamento de tecnología médica	Departamento de informática
Software y versión del Sistema Operativo	Consiste con los requisitos del fabricante	Atiende a lo que la empresa requiera y el Departamento de informática lo ejecuta.
Escaneos	Según las especificaciones del fabricante	Cambia si el departamento de TI realiza actualizaciones
Agente de Seguridad de TI	Proporcionado por el fabricante del equipo OT	Según la política del departamento de TI

Nota: [7]

Según la Tabla 1 se muestra que los equipos OT de línea médica (como un escáner de resonancia magnética) se deben al mantenimiento y funcionalidad del fabricante, y los equipos empresariales (como un computador de escritorio) al Departamento de informática del SH. Pese a estas diferencias, el SH debe acoplarse a los requisitos que solicite el dispositivo médico para su correcto funcionamiento y el Departamento de informática deberá implementar lo necesario para que estos equipos médicos trabajen en conjunto dentro de la red con su equipo empresarial.

Las herramientas para realizar los controles de seguridad a este tipo de equipos, se mantiene en continuas

actualizaciones porque la tecnología crece a medida de las necesidades requeridas, con la finalidad de poder analizar los riesgos a los que los equipos se puedan enfrentar para minimizar o prevenir ataques [12].

Dentro de los Sistemas de Control Industrial (SCI) se encuentran los equipos OT de grado médico, esta definición abarca a todos los sistemas de gestión y herramientas que tengan relación con procesos industriales [12]. Este tipo de sistemas permite realizar una enumeración de todos los activos técnicos que estén conectados a la red, comprendiendo todos los equipos de hardware hasta licencias de software, incluyendo a los activos más importantes categorizados como activos

críticos por su facilidad de ser vulnerables ante ciberataques informáticos.

Las consecuencias de un ataque cibernético en un equipo OT puede llegar desde provocar la pérdida de los datos, robo de los derechos de propiedad intelectual, interrupción operativa de los equipos hasta causar daños irreversibles en el sistema llevando a la organización a perder la confidencialidad, integridad y confianza de los clientes,

para caer en la quiebra y cierre del negocio. La gerencia deberá tomar con grado de alta importancia el tema de valorar la seguridad informática de los equipos OT en la red, como medida de prevención o plan de continuidad ante un ataque informático. Para ello, en el mercado se dispone de varias herramientas que permiten llevar un control de la seguridad de equipos industriales desde el nivel informático.

Tabla 2

Herramientas existentes para la detección de activos OT y Análisis de vulnerabilidades

Herramienta	Fabricante	Característica	No brinda
Tenable OT	Tenable	Muestra todos los activos conectados a la red Facilita información de la vulnerabilidad basada en el riesgo	Clasificación de activos críticos
Axonius	Axonius	Identificación de activos sin administración	No muestra las vulnerabilidades
Scrutiny	Bayshore networks	Muestra las conexiones en la red y sus dispositivos	No muestra las vulnerabilidades
Claroty	Claroty	Detecta amenazas, presenta los activos críticos y presenta la gestión de los dispositivos.	No muestra la clasificación de los dispositivos en riesgo.
Nozomi network	Nozomi	Muestra los activos que están conectados a la red, notificaciones de cambios de hardware en la red y gestión de las vulnerabilidades	No muestra la clasificación de los activos en riesgo.
CyberX	CyberX	Presenta una topología de la red, los activos y la gestión de vulnerabilidades.	No muestra la clasificación de los activos en riesgo.
AT&T security	AT&T Business	Clasifica los activos críticos y las vulnerabilidades. Enlista todos los activos conectados a la red.	
Liu et al	Applied Risk		No clasifica los activos de riesgo
Shodan	Shodan	Muestra información de todos los activos en la red	No muestra la clasificación de los activos de riesgo ni vulnerabilidades.

Nota: [12]

En la investigación se utilizó la herramienta Tenable OT, la misma que fue implementada en la institución en modo licenciamiento, debido a la coyuntura actual del país en relación a la ley orgánica de protección de datos la misma que en su Art. 40 hace referencia al análisis de riesgo, amenazas y vulnerabilidades, que se deben realizar con la finalidad de precautelar los datos personales de los pacientes. Esta herramienta se comunica con los dispositivos sin comprometer el funcionamiento normal del dispositivo a manera de consulta, recopila la información de modo pasivo de manera que se pueda definir el idioma nativo del dispositivo y con esto recolectar datos de configuración, versiones de firmware, usuarios, vulnerabilidad, metadatos y otros problemas de seguridad [13] realizando seguimientos de cambios sean estos en la red o en el propio dispositivo, estos cambios son analizados y envía la notificación

respectiva si se encuentra frente a un caso de inseguridad.

Tenable OT previene a las redes industriales de ataques cibernéticos, de agentes que comprometan la confidencialidad de la información y de errores humanos, identificando los activos y sus vulnerabilidades con el fin de solucionar estos accesos para garantizar la confiabilidad en el funcionamiento del equipo [14].

Figura 1

Entornos de OT



Nota: [14]

Principales Características:

- **Visibilidad convergente:** permite visualizar completamente de manera integral los componentes de OT e IT en cualquier plataforma de cómputo, usando las herramientas de Tenable como: SIEAM, SOAR, firewalls de próxima generación, firewalls basados en diodos, inventario de activos y gestión de cambios.
- **Detección de amenazas:** Mediante la metodología de detección múltiple, Tenable OT detecta cambios sospechosos en la red, aplica políticas de seguridad y emite alertas sobre ellas, las mismas que pueden originarse de fuentes externas o internas siendo ocasionadas por malwares o errores humanos. Tenable OT es capaz de reconocer incluso una amenaza de un equipo que no esté conectado a la red lo cual es útil para mitigar de manera ágil un respuesta inmediata, permitiendo a las organizaciones “detectar y mitigar los eventos de riesgos en los entornos de OT”[14]
- **Control de gestión de activos:** Se refiere a llevar un control de las versiones de firmware, sistema operativo, configuraciones, software, usuarios, número de series para todos los activos detectados en el inventario.
- **Control de vulnerabilidades:** Tenable OT, genera niveles de riesgo, puntuaciones de riesgo, sugerencias de mitigación a factores de riesgo con lo cual permite al personal debidamente autorizado a dar una solución rápido ante un ataque cibernético.
- **Control de configuración:** Mientras la organización se mantiene bajo las operaciones de Tenable OT, éste trabaja controlando cualquier cambio en la red sea por el personal operativo o algún malware de la misma red o en el mismo dispositivo llevando el registro respectivo, lo relevante de esta acción es que Tenable OT va guardando una copia de seguridad de los activos que tengan el estado Aceptable, por si se diera el caso de alguna anomalía, Tenable OT permite al usuario recuperar el último estado Aceptable del activo y continuar con el debido funcionamiento de los equipos. [15].

2. MÉTODO

Tenable OT puede proporcionar visibilidad completa de la infraestructura de TI y OT en un entorno médico, lo que incluye dispositivos médicos conectados, sistemas de control, redes y otros activos. Esta visibilidad es esencial para comprender la superficie de ataque y detectar posibles vulnerabilidades. Así como, es capaz de identificar y evaluar vulnerabilidades en una amplia gama de dispositivos y sistemas, incluidos los dispositivos

médicos. Esto ayuda a los equipos de seguridad a identificar de manera proactiva las debilidades en estos antes de que puedan ser explotados por amenazas cibernéticas.

La plataforma Tenable OT clasifica y prioriza las vulnerabilidades según su gravedad y el impacto potencial en la seguridad del entorno. Esto permite a los profesionales de seguridad enfocar sus esfuerzos en abordar las vulnerabilidades más críticas y reducir el riesgo. Puede ayudar a las organizaciones de atención médica a demostrar el cumplimiento al identificar y abordar las vulnerabilidades que podrían poner en riesgo la privacidad y seguridad de los datos del paciente.

Además de la evaluación de vulnerabilidades, Tenable OT también puede detectar actividad sospechosa y amenazas en tiempo real en los sistemas médicos. Esto es crucial para identificar y responder rápidamente a posibles ataques cibernéticos. Proporcionando informes detallados que pueden ser útiles para las auditorías de seguridad y para comunicar los resultados a las partes interesadas en la organización de atención médica, incluyendo la alta dirección y las autoridades reguladoras.

De acuerdo con la realidad de la institución se determinó la factibilidad del uso de la herramienta de análisis de vulnerabilidades para equipos OT (Tenable OT), la misma que se ha implementado debido al despliegue de su esquema de seguridad en la actualidad.

Es de gran importancia recalcar la apertura de la institución en temas de seguridad de la información y la preocupación del aseguramiento de su infraestructura tecnológica que ha hecho posible que esta herramienta esté disponible para este trabajo ya que herramientas como esta, son de difícil acceso tanto por su costo como por su poca socialización en giros de negocio similares.

La metodología de investigación a utilizar para alcanzar los objetivos del presente proyecto es la mixta, ya que se va a realizar la exploración directa a través de la herramienta de análisis de vulnerabilidad planteada. La metodología cuantitativa se utilizará en la elaboración de análisis de riesgo con la finalidad de conocer: ¿Cuáles son las vulnerabilidades más comunes en los equipos OT analizados?, ¿Cuáles son los equipos y fabricantes con más riesgo? y ¿Cuáles son las vulnerabilidades más severas?

La investigación se desarrolló en las siguientes fases:

Primera Fase. Una vez estudiado el contexto de la herramienta Tenable OT, se determinó que el nivel de madurez de la misma en base a su posicionamiento en el mercado de ciberseguridad a nivel mundial, como líder en análisis de vulnerabilidades; así como la estructura de su documentación y organización permitió la aplicación del documento “Checklist-ICS-Cyber-Security-

Considerations_es-la”, con la finalidad de establecer una línea base sobre las áreas y los equipos OT con los que se va a trabajar.

Segunda Fase. Al evaluar el documento propuesto en la primera fase se determinó el alcance en cuanto los dominios de los criterios a utilizar en el presente trabajo los cuales se detallan a continuación: Visibilidad a lo largo de la infraestructura de TO, Inventario de activos, Detección de amenazas, Evaluación de vulnerabilidades y gestión de riesgo y Escala de riesgo proporcionada por el fabricante.

Tabla 3
Niveles de Riesgo tecnológico en Hospital SOLCA Núcleo Quito

	Riesgo Bajo ($\geq 1 \leq 30$): Se mantiene vigilado, aunque no necesite de medidas preventivas.
	Riesgo Medio ($\geq 31 \leq 60$): Realizar un análisis, de ser posible implementar medidas preventivas para reducir el nivel de riesgo caso contrario se mantienen controlada las variables
	Riesgo Crítico ($\geq 61 \leq 100$): Implementación de medidas de mitigación y prevención ante un ataque cibernético.

Tercera Fase.

Análisis de resultados: Una vez que se implementó la herramienta de análisis la misma que está compuesta por un equipo de core que realiza el procesamiento de la información que es enviada por el segundo componente un, sensor en modo sniffer, se pudo identificar los equipos agrupados de acuerdo a las sub redes asignadas por la institución, de esta manera se logró inventariar los equipos OT de acuerdo a su criticidad declarada por la herramienta en base a su “know how” basado en varios factores como marca, modelo, fabricante y tipo; a fin de dar respuesta a las interrogantes planteadas.

¿Cuáles son las vulnerabilidades más comunes en los equipos OT analizados?

En la Fig. 1 se enumera las vulnerabilidades más comunes, por ejemplo, que el host remoto está escuchando en el puerto UDP 137 o en el puerto TCP 445, y responde a solicitudes NetBIOS nbtscan o SMB, otra vulnerabilidad hace referencia al envío de una solicitud de búsqueda al mapeador de puertos (TCP 135 o epmapper PIPE) con lo cual fue posible enumerar la Computación Distribuida de servicios de entorno (DCE) que se ejecutan en el puerto remoto. Usando esta información es posible conectar y vincular a cada servicio enviando una solicitud por RPC al puerto remoto.

Figura 2
Vulnerabilidades más comunes

Name	Severity	VPR	Affected assets
Windows NetBIOS / SMB Remote Host Informati...	Info		1
Traceroute Information	Info		1
DCE Services Enumeration	Info		1
Microsoft Windows SMB Native Lan Manager Re...	Info		1
SSL Certificate Information	Info		1
Microsoft Windows SMB Service Detection	Info		1
Nessus SYN scanner	Info		1
OS Identification	Info		1
Nessus Scan Information	Info		1
OS Command Execution	Info		1

¿Cuáles son los equipos y fabricantes con más riesgo?

Como se puede observar en la Fig. 3 los equipos que presentan mayor riesgo son el de gamma cámara de marca Siemens, la estación de comando de la resonancia magnética de marca Hewlett Packard y un ecógrafo de marca Avalue Technology. Inc. Al ser equipos llave en mano se debe realizar una reunión con el fabricante para determinar el nivel de riesgo aceptable.

Figura 3
Listado de equipos de acuerdo con el riesgo

Name	Type	Risk	IPs	MACs	Vendor
MEDNUC GAMMAC 2	OT Workstat...	38	192.16...	4c:5...	Siemens
IMA RESONANCIA	OT Device	38	192.16...	84:a...	Hewlett...
IMA ECO8	OT Device	38	192.16...	00:0...	Avalue ...
MEDNUC GAMMAC 1	OT Workstat...	38	192.16...	90:1...	Fujitsu ...
IMA ECO9	OT Device	38	192.16...	00:0...	Avalue ...
IMA ECO7	OT Device	38	192.16...	00:0...	Advant...
MEDNUC GAMMAC 1 PROE	OT Workstat...	38	192.16...	40:a...	HP
IMA BX2	OT Device	38	192.16...	90:1...	Fujitsu ...
CITOM201	OT Device	38	192.16...	f4:39...	HP
CITELU MICROS	OT Device	38	192.16...	00:2...	CARL Z...

¿Cuáles son las vulnerabilidades más severas?

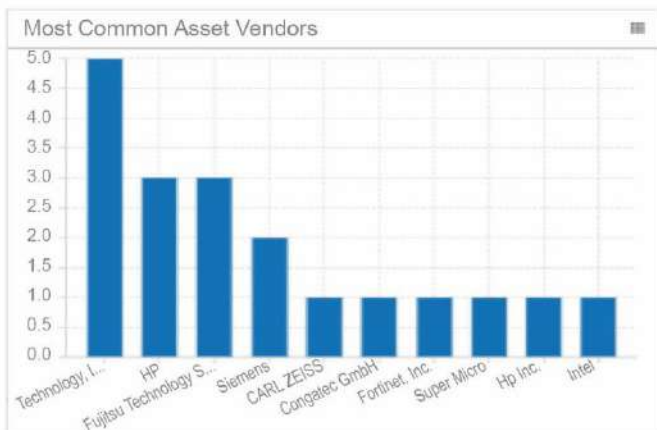
En la Fig. 4 se enumera las vulnerabilidades más severas, por ejemplo, la vulnerabilidad con severidad crítica indica que se puede ejecutar un código remotamente arbitrario, la vulnerabilidad baja indica que el host remoto permite conexiones SSL/TLS con uno o más Módulos del algoritmo Diffie-Hellman menores o iguales a 1024 bits, un atacante a través de criptoanálisis, puede recuperar el texto sin formato o violar potencialmente la integridad de las conexiones.

Figura 4
Vulnerabilidades Críticas

Name	Severity	VPR	Affected assets
Microsoft Message Queuing RCE (CVE-2023-215...	Critical	9.4	1
SSL/TLS DHE-Heilman Modulus <= 1024 Bits (Ia...	Low	4.5	1
Tracroute Information	Info		1
Microsoft Windows SMB NativeLanManager Re...	Info		1
SSL Certificate Information	Info		1
Microsoft Windows SMB Service Detection	Info		1
OS Identification	Info		1
Nmap SYN scanner	Info		1
Nessus Scan Information	Info		1
OS Patching Information	Info		1

En la Fig. 5 y Fig. 6 (Anexo Fig.6) se muestra una visión general del equipamiento OT por fabricante y clasificado por el sistema operativo que utiliza.

Figura 5
Equipamiento Ot por fabricante



En la Fig. 7 (Anexo Fig.7) y Fig. 8(Anexo Fig.8) permite tener una visión holística de la distribución y comportamiento de los equipos OT en la infraestructura de networking del Hospital.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ámbito hospitalario los equipos médicos especializados para procedimientos médicos generales y oncológicos son adquiridos a empresas que manejan sus soluciones con un formato “llave en mano” lo que implica que la gestión en su totalidad es por parte del proveedor en el manejo y soporte tanto operativo como tecnológico, lo cual implica que la institución hospitalaria pierda visibilidad de los mismo en su infraestructura, por eso la importancia de monitorear el ámbito de seguridad informática para verificar que los proveedores manejan estándares de seguridad mínimos para estos equipamientos; la herramienta utilizada provee una base de conocimiento propia para evaluar estas vulnerabilidades la misma que se está aprovechando para validar y minimizar el riesgo en la infraestructura del hospital[14]. En tal sentido, los resultados del análisis de

vulnerabilidades en los equipos OT de la institución evidencia que existen 50 equipos de grado médico (OT) distribuidos principalmente en las áreas de Imagenología, Medicina nuclear, Radioterapia y áreas afines, mismos que soportan los procedimientos de análisis, diagnóstico y tratamiento oncológico en los pacientes, razón por la cual este equipamiento es crítico para el desempeño de las actividades médicas en el hospital por lo que su aseguramiento tecnológico es de vital importancia para reducir los riesgos y vulnerabilidades. Tomando en cuenta, que la mayoría de los dispositivos médicos utilizan tanto hardware como software para realizar operaciones críticas. Además, ya no están aislados y utilizan tecnologías de comunicación para proporcionar servicios sanitarios de calidad. Los dispositivos médicos en red han permitido mejorar las posibilidades de diagnóstico, tratamiento y enfermedades crónicas. La pronta proliferación en la interconectividad de los dispositivos médicos con otros sistemas relacionados ha mejorado profundamente la atención al paciente[16].

Los investigadores del mundo académico, la industria y anuncios públicos han informado con frecuencia de la presencia de vulnerabilidades de seguridad en el firmware de los dispositivos médicos conectados y sus causas subyacentes. El tema común es la ausencia de medidas de seguridad en el diseño de los sistemas electrónicos (software) que se integra en estos dispositivos, el software utilizado en los dispositivos médicos es de extrema importancia, ya que es responsable de funciones críticas[2]. Por otra parte, en el caso de los equipos médicos OT, la seguridad no se tuvo en cuenta al fabricar estos dispositivos y, por este motivo, utilizan protocolos inseguros[16]. Con relación a las vulnerabilidades encontradas se determinó que las mismas en su mayoría están categorizadas con un riesgo bajo el mismo que la institución los ha aceptado como política de seguridad, también se encontró 2 riesgos críticos relacionados a accesos remotos a los equipos mismos que fueron notificados a las empresas a cargo para su mitigación al ser soluciones llave en mano. Las vulnerabilidades presentes en el software de los dispositivos médicos son las principales responsables ciberataques en la sanidad[10].

En resumen, estos resultados subrayan la importancia de mantener estándares de seguridad óptimos para la seguridad de la información de la institución más aun tomando en cuenta la actualidad del país en cuanto a normativas que obligan a asegurar la información y datos personales de los pacientes. Se recomienda realizar auditorías continuas y programadas a fin de validar que las vulnerabilidades no rebasen el umbral de riesgo aceptado por el hospital. De acuerdo a la tabla Tabla 3, el umbral de riesgo aceptado por la institución es ≤ 60 lo que corresponde a un nivel de riesgo medio y bajo.

De igual manera se debe complementar con análisis de seguridad a la red y accesos a sistemas críticos no médicos

y que tengan interoperabilidad con el equipamiento de grado médico (OT) a fin de garantizar la seguridad de la información a nivel general de la organización.

4. CONCLUSIONES

El análisis de las vulnerabilidades en equipos OT, permite tener una línea de vista del equipamiento médico en la institución que por años no se han podido analizar a profundidad a fin de determinar brechas de seguridad o corroborar el nivel de aseguramiento del proveedor dado que los mismos entregan estas soluciones como un esquema “llave en mano” que no pueden ser manipulados por el personal de TIC.

También se propone realizar en un futuro una comparativa de resultados de análisis de vulnerabilidades de equipos de grado médico (OT) en otras instituciones de salud a fin de determinar de manera macro el nivel de seguridad que los proveedores de estos equipamientos aplican.

De igual manera se logró determinar que esta herramienta ha sido de vital importancia para la administración, monitoreo y seguridad de esta área de infraestructura tecnológica de la organización.

A pesar de encontrar vulnerabilidades críticas puntuales en alguno de los equipos ha sido de gran valía determinar también que el riesgo se mantiene en medio (moderado) y mínimo a manera general en los equipos analizados.

La gestión de vulnerabilidades de estos equipos de grado médico (OT) aporta a la concientización de los administradores de sistemas y seguridad del hospital sobre la importancia de la seguridad ya que, los mismos son utilizados para manejo de información crítica de los pacientes al almacenar la información médica.

REFERENCIAS

- [1] S. F. Ahmed, M. S. Bin Alam, S. Afrin, S. J. Rafa, N. Rafa, and A. H. Gandomi, “Insights into Internet of Medical Things (IoMT): Data fusion, security issues and potential solutions,” *Inf. Fusion*, p. 102060, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.inffus.2023.102060.
- [2] H. Verma, N. Chauhan, and L. K. Awasthi, “A Comprehensive review of ‘Internet of Healthcare Things’: Networking aspects, technologies, services, applications, challenges, and security concerns,” *Comput. Sci. Rev.*, vol. 50, p. 100591, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100591.
- [3] S. A. Wagan, J. Koo, I. F. Siddiqui, M. Attique, D. R. Shin, and N. M. F. Qureshi, “Internet of medical things and trending converged technologies: A comprehensive review on real-time applications,” *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, no.

Las amenazas relacionadas con la confidencialidad incluyen situaciones en las que el adversario obtiene acceso no autorizado a información sensible. En las amenazas relacionadas con la integridad, el atacante manipula información sensible sin autorización. Sin embargo, los ataques relacionados con la disponibilidad incluyen casos en los que el adversario actúa para denegar servicios a usuarios legítimos.

Los ciberataques se dirigen a diferentes empresas, incluido el sector médico. Desde dispositivos médicos como marcapasos hasta instituciones médicas como hospitales y clínicas son objetivos vulnerables para los ciberdelincuentes. Las infracciones cibernéticas en el ámbito médico no sólo pueden poner en riesgo la vida de los pacientes, sino que también pueden provocar la fuga de datos sensibles y confidenciales. Debido a la naturaleza de los objetivos médicos y su importancia y sensibilidad, existe una gran necesidad de revisar e investigar las vulnerabilidades y debilidades actuales y pasadas dentro de los dispositivos y las instituciones médicas. Esta investigación tiene como objetivo investigar las vulnerabilidades recientes y actuales de las instituciones y dispositivos médicos y resaltar la importancia de las cuestiones de seguridad cibernética en esta área.

Se ha visionado como trabajo futuro incrementar el análisis de vulnerabilidades a equipos de grado médico (OT) que se los denomina móviles, en vista de que los mismos no mantienen una conexión permanente a la red de la organización y los mismos fueron catalogados como de menor riesgos por los coordinadores de las áreas analizadas.

- 10, pp. 9228–9251, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2022.09.005.
- [4] P. O. Iyiewuare, I. D. Coulter, M. D. Whitley, and P. M. Herman, “Researching the Appropriateness of Care in the Complementary and Integrative Health Professions Part 2: What Every Researcher and Practitioner Should Know About the Health Insurance Portability and Accountability Act and Practice-based Research in the United States,” *J. Manipulative Physiol. Ther.*, vol. 41, no. 9, pp. 807–813, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jmpt.2018.11.003.
- [5] L. Gupta, T. Salman, A. Ghubaish, D. Unal, A. K. Al-Ali, and R. Jain, “Cybersecurity of multi-cloud healthcare systems: A hierarchical deep learning approach,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 118, p. 108439, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.asoc.2022.108439.

- [6] A. Orozco, "Sobrevida libre de enfermedad en pacientes con cáncer de recto localmente avanzado que recibieron quimio-radioterapia en Hospital SOLCA Quito", vol. 33, no. 1, pp.89, Quito, 2022.
- [7] D. Citharthan, M. Varatharaj, and P. Rajan, "Role of Cryptography and Its Challenges in Integrating Secured IoT Products", no. November, 2020. doi: 10.1201/9781003032441-3.
- [8] J. F. Andrade, "Ciberseguridad y Salud," *INNDEV - Innov. Dev. Ciencias del Sur*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11, 2023, [Online]. Available: <https://www.itscs-cicc.com/ojs/index.php/inndev/article/download/47/17>
- [9] J. García and L. Herrero, "La ciberdefensa en los sistemas de información sanitarios militares," vol. 76, no. 3, pp. 140–142, 2020, doi: 10.4321/S1887-85712020000300001.
- [10] S. T. Argaw *et al.*, "Cybersecurity of Hospitals: Discussing the challenges and working towards mitigating the risks," *BMC Med. Inform. Decis. Mak.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1186/s12911-020-01161-7.
- [11] B. C. Santamaría, "concepto de tres herramientas de gestión y análisis de vulnerabilidades," 2021.
- [12] C. Liu, Y. Alrowaili, N. Saxena, and C. Konstantinou, "Cyber risks to critical smart grid assets of industrial control systems," *Energies*, vol. 14, no. 17, pp. 0–19, 2021, doi: 10.3390/en14175501.
- [13] H. Pulkkinen, "SAFE SECURITY SCANNING OF A PRODUCTION STATE AUTOMATION Master of Science Thesis," December, 2022.
- [14] H. D. E. Datos, "Tenable.ot™," 2023.
- [15] E. L. D. D. E. La, "DE CIBERSEGURIDAD INDUSTRIAL," 2023.
- [16] T. Yaqoob, H. Abbas, and M. Atiquzzaman, "Security Vulnerabilities, Attacks, Countermeasures, and Regulations of Networked Medical Devices—A Review," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3723–3768, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2914094.

Anexo

Figura 6

Equipamiento OT por OS

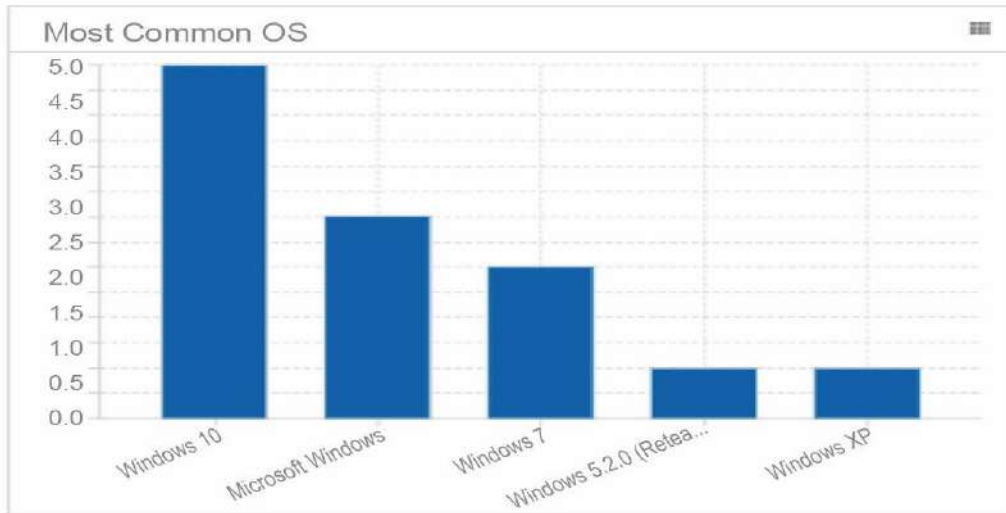


Figura 7

Mapa de red de equipos OT

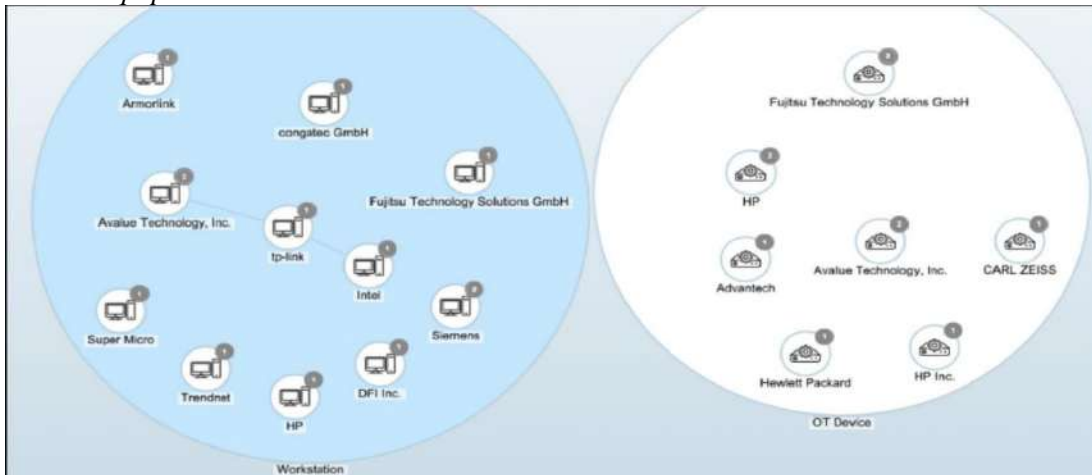


Figura 8

Tráfico de red de equipamiento OT





REVISTA INGENIO

Desarrollo del Marco Metodológico para la Calibración y Validación del Modelo Hidrodinámico del Sistema de Alcantarillado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Development of the Methodological Framework for the Calibration and Validation of the Hydrodynamic Model of the Sewer System of the Faculty of Engineering and Applied Sciences

Diego Fernando Paredes Méndez [1](#) | [ID](#) Universidad Central del Ecuador, Quito (Ecuador)

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recepción: 06/08/2023
Publicación: 31/01/2024

PALABRAS CLAVE

Sistemas de drenaje urbano, modelo hidrodinámico, monitoreo hidrometeorológico, validación, PCSWMM, calibración,

ARTICLE HISTORY

Received: 01/12/2023
Accepted: 31/01/2024

KEY WORDS

Urban drainage systems, hydrodynamic model, monitoring flows and rainfall, calibration and validation, PCSWMM.

RESUMEN

Los sistemas de drenaje urbano (SDU) han existido desde épocas del Imperio babilónico. Su objetivo es preservar y promover la salud pública, bienestar social, protección de inundaciones, contaminación de cuerpos receptores. El crecimiento poblacional en áreas urbanas, cambio climático, envejecimiento de las estructuras provocan el colapso de esta infraestructura sanitaria e inundaciones. En la presente investigación se desarrolló un marco metodológico para evaluar el funcionamiento hidráulico del sistema de alcantarillado de una cuenca piloto. Mediante tres tipos de información: espacial, temporal y topográfica se generaron principalmente lluvias de diseño, lluvias históricas, caudales y patrones de agua residual, topología del SDU del área de estudio, usos, cobertura del suelo, DTM, DSM, ortofoto; consecuentemente, el modelo hidrodinámico 1D de drenaje urbano fue construido. Mediante mediciones hidrometeorológicas registradas en sensores ultrasónicos para medir calados y velocidades del flujo en las tuberías y un pluviómetro, se calibró y validó el modelo de drenaje.

ABSTRACT

Urban drainage systems (UDS) have existed since the Babylonian Empire. Its objective is to preserve and promote the public health, welfare, flood protection, water pollution. Population growth in urban areas, climatic change, ageing structures, produce failures in the sewer systems, and urban flooding. Therefore, in this research, a methodologic framework was developed to assess the hydraulic performance of an UDS in a pilot basin. By using three kinds of information, spatial, temporal and terrain, a number of products were generated such as: design rainfall, historic precipitation, dry weather flows and their patterns, topological network, land uses, DTM, DSM, orthophoto, subsequently a hydrodynamic 1D model was built. Calibration and validation of the model was carried out by employing hydrometeorological data that was registered in four sensors to measure depth, velocity of the flow and a gauge station that were implemented in the study area.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de drenaje urbano (SDU) son una de las infraestructuras sanitarias más importantes de la sociedad, cuya función principal es preservar la salud pública, maximizar el bienestar social y reducir la frecuencia de inundaciones. Una variedad de factores afecta el funcionamiento de los SDU. El crecimiento urbanístico modifica constantemente los usos y coberturas de suelo, provocando varios efectos en el ciclo hidrológico, principalmente la reducción de infiltración y tiempos de concentración, incremento de picos, volúmenes y velocidades de escorrentía. [1] De igual forma, la alteración de los patrones de lluvias por el cambio

climático. Otros factores son el envejecimiento propio de la infraestructura de alcantarillado, sedimentos en los conductos y sumideros, los mismos que en conjunto o independientemente contribuyen con el colapso de los sistemas sanitarios. Los resultados son inundaciones urbanas, que constituyen uno de los impactos más peligrosos en la sociedad, y que provocan no solamente grandes afectaciones ambientales y económicas, sino también, y la más sensitiva, la pérdida de vidas humanas. El funcionamiento de los SDU es muy complejo, por la variabilidad espaciotemporal de sus parámetros hidráulicos y físicos, así se tiene el cambio súbito de flujo

de superficie libre a presurizado, subcrítico a supercrítico. Esta variabilidad se debe tanto a las condiciones iniciales y de borde como a las características de la topología del sistema [2]. Para disponer de una gestión óptima de los SDU, con una visión preventiva y proactiva, es esencial invertir en información base e implementar un modelo hidrodinámico que permita analizar, calcular y comprender su funcionamiento hidráulico e hidrológico [3], cuyos resultados servirán de aporte en la toma de decisiones de ampliación, operación, rehabilitación y construcción de obras de mitigación. Estas actividades representan una inversión considerable para los gobiernos locales, mismas que frecuentemente son subestimadas hasta que eventos catastróficos sucedan [4]. Para disminuir el grado de incertidumbre de los resultados arrojados por el modelo, de tal forma que estos sean representativos y confiables, se deben ejecutar una serie de actividades de campo, como catastros técnicos del sistema de alcantarillado, levantamiento, monitoreo hidrometeorológico, que son cruciales para efectuar los procesos de calibración y validación [5]. La presente

investigación se enfoca en la evaluación y diagnóstico hidráulico del funcionamiento del sistema de alcantarillado de una cuenca piloto. Para lo cual un marco metodológico fue desarrollado para calibrar y validar el modelo hidrodinámico, mismo que está compuesto de una serie de etapas que están interrelacionadas entre sí.

Área de estudio

El propuesto marco metodológico de esta investigación fue ensayado en una cuenca piloto en la Universidad Central del Ecuador. En la Figura 1 se observa el mapa del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) con sus cuatro cuencas de drenaje urbano del cantón Quito. El área de estudio se encuentra en el sector centro norte de la ciudad de Quito, en el límite de las cuencas de Anglo French y el Batán, tiene una superficie de 4,45 hectáreas que abarca el sistema de alcantarillado combinado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas y como aporte las Facultades de Ciencias Químicas y Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, construido hace más de 60 años.

Figura 1

Entornos de OT



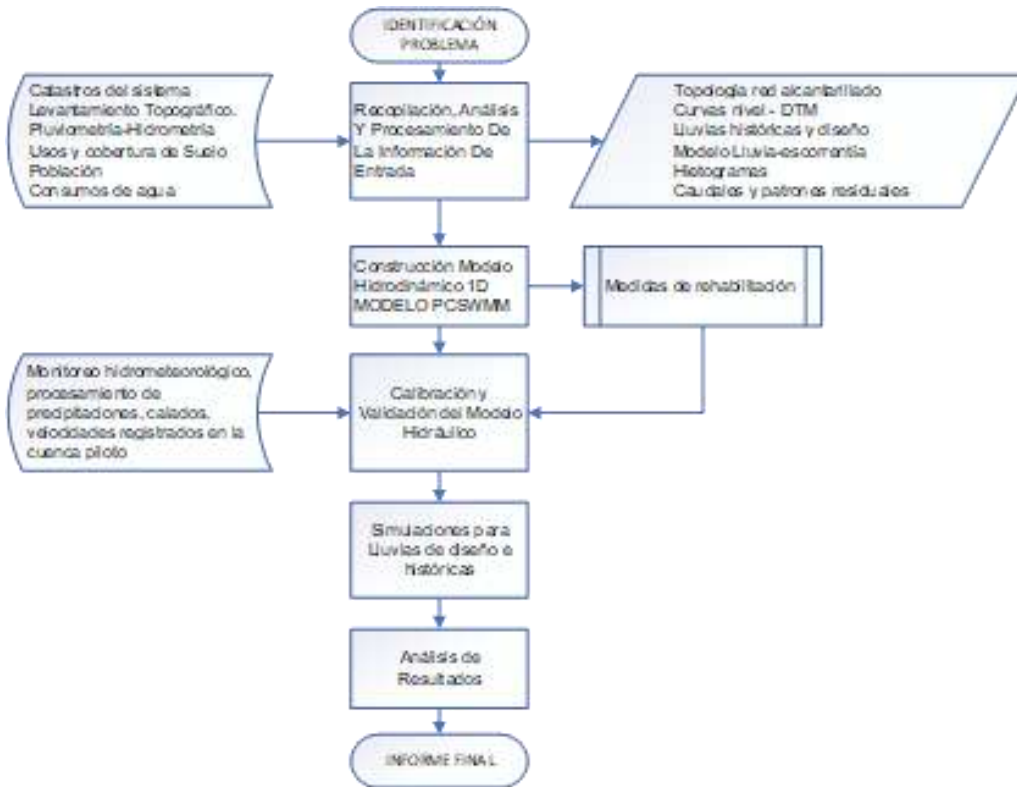
2. MÉTODO

Los diferentes pasos efectuados para generar el marco metodológico para la calibración y validación del modelo hidrodinámico del sistema de alcantarillado del área de estudio están resumidos en el siguiente flujograma.

Las principales herramientas computacionales utilizadas en la presente investigación son: sistemas de información geográfica con ArcMap 10.8.2, en donde se almacenó la geodatabase que contiene la topología del sistema de alcantarillado y se procesó los datos del levantamiento

LIDAR para generar los modelos digitales del terreno; software académico PCSWMM para evaluar el funcionamiento hidrológico e hidráulico del sistema de alcantarillado; Autodesk ReCap para generar imágenes 3D de los datos LIDAR; YDOC INSIGHTS, software que recibe en tiempo real la información hidrometeorológica registrada por los sensores de calado, velocidad y pluviometría.

Figura 2
Metodología de estudio



Nota. Principales pasos de la metodología.

2.1. Recopilación, análisis y procesamiento de la información de entrada

Existen tres tipos de información básica de entrada en el modelo: temporal, topográfica y espacial.

Información temporal

Es la concerniente a las variables hidrológicas e hidráulicas de la zona de estudio, como precipitación, calados y velocidades del flujo, caudales y patrones de variaciones en períodos secos. Para la generación de lluvias de diseño se utilizaron las curvas IDF de estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de estudio, La Chorrera-Rumipamba Bodegas (2,7 km),

Iñaquito-Inamhi (3,0 km) y Quito-Observatorio (1,8 km) pertenecientes a la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) [6]. (ver Figura 3). Adicional a las lluvias de diseño, se utilizaron lluvias históricas, es decir, eventos registrados que causaron colapsos en el sistema de drenaje de Quito; en este caso se consideró las estaciones Iñaquito-Inamhi y Cruz Loma. Para el proceso de calibración del modelo se instalaron un sensor pluviométrico (P-FING), en la terraza del edificio de la Dirección de Ingeniería Civil, y dos sensores ultrasónico y piezométrico (H-FING) para medir el calado y velocidad del flujo en el pozo a la salida del área de estudio.

Figura 3
Ubicación de estaciones hidrometeorológicas



Nota. Estaciones circundantes EPMAPS y área de estudio.

Figura 4

Ubicación de estaciones hidrometeorológicas



Nota. Sensores de medición de velocidades y calados del flujo y pluviómetro.

Para la obtención del caudal doméstico, se multiplicó el coeficiente de retorno de 0,80 por la población universitaria (docentes, estudiantes y personal administrativo) y por la dotación neta, que está en función del consumo real de agua potable registrado en la zona de estudio correspondiente al período académico 2019-2019, cuando se laboró en forma normal antes de la pandemia. Este caudal doméstico corresponde al caudal medio diario de aguas residuales, debido a que por las características de consumo de la universidad no se consideraron caudales comerciales e industriales.

Los patrones de variación horaria fueron derivados en función de la afluencia de los estudiantes del área de estudio, de acuerdo con sus horarios de clases, de esta manera se obtuvieron los factores pico. El caudal máximo horario corresponde al producto de estos factores por el caudal medio diario. El caudal de infiltración se obtuvo de acuerdo con lo especificado en un sistema de nivel de complejidad medio, conforme a las normas de diseño de la EPMAPS. Finalmente, el caudal de diseño fue calculado con la sumatoria del caudal medio diario y el caudal de infiltración, sin considerar caudales de conexiones ilegales.

Información tipográfica

Mediante el levantamiento «LIDAR» (Light Detection and Ranging) «Detección por luz y distancia» (ver Figura

5), que es un sistema de teledetección que mide la distancia entre el punto de emisión del láser (dron) y los diferentes puntos del entorno de la superficie terrestre [8], y la materialización de varios puntos de control en el área, con levantamientos de sistemas de posicionamiento global GNSS, se obtuvo detalles de la superficie del terreno, coordenadas y cotas de pozos de revisión, generación de curvas de nivel y el modelo digital del terreno (DTM, Digital Terrain Model), cuya resolución incide notablemente en los resultados del modelo 1D y futuros modelos en 2D [7].

Figura 5

Equipos levantamiento LIDAR



Nota. Dron, equipos GNSS

Información personal

Parte de esta información está relacionada con las características físicas de los componentes del sistema de alcantarillado para implementar el modelo hidrodinámico 1D, que es fruto de la ejecución de las actividades del

catastro técnico del sistema de alcantarillado. Anexo Fig. 6.

Adicional a esta información, se generaron los usos y cobertura del suelo para determinar parámetros de los modelos de infiltración, características geológicas, clasificación de sistema unificado de clasificación de los suelos (SUCS), conductividad hidráulica y generación de hidrogramas de escorrentía en las subcuencas de aporte, entre los principales. Para lo cual se realizaron ensayos de campo con infiltrómetros, toma de muestras de suelos para ensayar en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la facultad. Anexo Fig. 7.

2.2. Construcción modelo hidrodinámicos 1D (PCSWMM)

Como resultado del catastro técnico del sistema de alcantarillado del área de estudio se construyó el modelo de drenaje urbano 1D en el software académico PCSWMM 7.5. Anexo Fig. 8.

La implementación del modelo hidráulico 1D del sistema de alcantarillado de la facultad consiste en ingresar la información y parámetros al modelo hidrodinámico PCSWMM 7.5 como son:

Información topológica: tuberías, pozos o cajas de revisión, descarga y subcuencas con sus propios parámetros.

Estación pluviométrica con las series de tiempo de los diferentes eventos.

Caudales sanitarios y patrones de aguas residuales.

Parámetros de las subcuencas: pozos de salida, área, áreas permeables e impermeables, pendiente, coeficiente de depresión, modelos de infiltración.

Modelo de la curva cn fue utilizado para el cálculo de infiltración.

El modelo consta de 96 subcuencas con un área total de 4,5 hectáreas, 127 pozos, 126 tuberías, 1 descarga.

2.3. Calibración y validación del modelo de drenaje urbano

Con el modelo 1D implementado en el software PCSWMM de la red de drenaje, se procedió a calibrar y validar el mismo, con la utilización de las mediciones simultáneas de los sensores hidrometeorológicos instalados en el área de estudio en diciembre de 2022. Durante el período ene- ro-octubre 2023 se registraron eventos pluviométricos significativos, mismos que permitieron seleccionar 4 eventos para el proceso de calibración y 3 para la validación.

La calibración fue efectuada modificando ciertos

parámetros de las subcuencas, como: ancho, pendiente, porcentaje de impermeabilidad, coeficientes de rugosidad «n» de las superficies impermeables, almacenamiento superficial y rugosidad de tuberías, mediante la utilización de la herramienta SRTC (Sensitivity-based Radio Tuning Calibration) de PCSWMM, que permite ajustar los valores simulados a los valores medidos. [9] SRTC utiliza rangos de incertidumbre para variar automáticamente los parámetros de las subcuencas hasta encontrar el mejor ajuste «goodness of fit», considerando ciertos indicadores estadísticos como: la integral del error cuadrático con sus siglas (ISE, Integral Square Error) (Excelente <3 – Malo >25)); la eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (Excelente >80% – Insuficiente <20%); el coeficiente de determinación R2 (Excelente =1); el error cuadrático medio (RMSE) (Exacto aprox.=0); mínimos cuadrados [10].

2.4. Simulaciones para lluvias de diseño e históricas

Con un modelo calibrado y validado, es decir, que refleje resultados cercanos a la realidad, se procede a evaluar el comportamiento de la red bajo varios escenarios con lluvias de diseño generadas con las ecuaciones IDF de las estaciones pluviométricas cercanas al área de estudio con diferentes períodos de retorno. Adicionalmente se evaluó con lluvias históricas registradas en los años 2017 y 2022, mismas que causaron inundaciones en pasos deprimidos de la y, avenida Atahualpa, sector plataforma financiera norte, aluvión de La Gasca.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Información pluviométrica

Las estaciones pluviométricas Quito-Observatorio; Ñaquito-Inamhi y la Chorrera-Rumipamba bodegas de la EPMAPS, son circundantes al área de estudio. Considerando la extensión reducida del área de estudio aproximadamente 4,5 hectáreas, distancia entre las estaciones pluviométricas con la zona de estudio, y que la estación Quito-Observatorio presenta mayores eventos pluviométricos, no se contempló la variabilidad espacial de la lluvia, y se trabajó con los hietogramas de diseño (2, 10, 25 y 50 años de período de retorno) derivadas de la ecuación IDF de la estación Quito-Observatorio. En la figura 9 se muestra el hietograma para el período de retorno de 25 años. Anexo Fig. 9.

Adicional a los hietogramas de diseño, se empleó en la evaluación hidráulica del sistema de drenaje dos eventos históricos (Anexo Fig. 10) registrados en las estaciones pluviométricas Ñaquito-Inamhi el 24 de abril de 2017, y

en Cruz Loma el 31 de enero de 2022. El primer evento se produjo durante 95 minutos, desde las 13h50 a las 15h25, con una precipitación acumulada de 44,9 mm. Mientras que, en el segundo evento, la precipitación ocurrió de forma continua durante 24 horas, con un total de 75,1 mm. Como productos (Anexo Fig. 11) del levantamiento LIDAR se obtuvo principalmente archivos de tipo LAS, que sirvieron para obtener curvas de nivel cada metro, DTM (modelo digital del terreno), DSM (modelo digital de superficie), ortofoto, en el sistema de coordenadas wgs84 17s, y las locales del Distrito Metropolitano de Quito (sires).

3.2 Información espacial

Las actividades de los catastros técnicos permitieron identificar varios puntos críticos en la red (Anexo Fig. 12), con problemas de funcionamiento debido a la falta de mantenimiento como son: taponamientos en pozos, cajas de revisión y conductos con gran cantidad de sedimentos, basura y material orgánico, tuberías rotas, tramos de considerable longitud sin tuberías. Estos problemas impedían la circulación de los flujos en la red, provocando inundaciones, mal funcionamiento de los

baños de oficinas y estudiantes, desborde de las aguas residuales a los espacios verdes de la facultad, generando un ambiente desagradable al personal y estudiantes. Como obras de mitigación se efectuaron una serie de actividades de limpieza de pozos, tuberías, renovación y reemplazo de tramos de tuberías y pozos, lo que ha permitido mejorar el nivel de servicio de la red de drenaje de la facultad.

El modelo 1D construido en PCSWMM, consta de una red de tuberías con una longitud total de 1,7 km, con materiales de PVC (30%) y hormigón simple (70%), y con secciones circulares que varían en un rango de 0,1 a 0,3 m. En la Figura 13, se aprecia la red de alcantarillado y los diferentes usos de suelo del área de estudio, que tiene un 67% de áreas impermeables (techos, aceras, calzadas de asfalto y adoquín) y el 33% de zonas permeables (áreas verdes de jardines con césped y árboles. Anexo Fig. 13).

Mediante los resultados de los ensayos de granulometría en varios puntos de la zona de estudio (D10, D30, D60, Cc, Cu, porcentajes de grava, arenas y finos), tipos de suelo hidrológico y cobertura de suelo, y con la utilización de intersección de polígonos de las subcuencas en ArcMap se obtuvieron los números de curva (cn) para cada área de aporte.

Tabla 1

Números de curva (cn) para cada área de aporte

Tipo de suelo	Cobertura	Número de curva CN
A	Espacios abiertos con cobertura de césped > 75%	39
-	Pavimentados asfálticos	98
-	Techos y aceras de hormigón	98
-	Adoquinados	70

Nota. Valores de cn en las subcuencas

3.3 Calibración y validación del modelo

El procedimiento de la calibración y validación se resume en la siguiente Figura 14. Anexo Fig. 14.

Como se mencionó en el numeral 3.3, el propósito de la calibración es disminuir la diferencia entre valores simulados y medidos, ajustando los parámetros de subcuencas y tuberías hasta que esa diferencia esté dentro de rangos óptimos de los indicadores estadísticos, utilizando la información registrada cada minuto en los sensores hidrometeorológicos. Esta información fue observada durante el período enero-octubre de 2023; a continuación, se presenta la información instantánea de enero a abril, cuando acontecieron eventos pluviométricos significativos. Anexo Fig. 15.

Luego del análisis hidrológico detallado y en función de la importancia de la magnitud de las variables de precipitación, nivel y velocidad se han elegido los siguientes eventos para calibrar y validar el modelo, en la Figura 16 (Anexo Fig. 16) se muestran un evento por cada proceso.

Los hietogramas de los eventos seleccionados (ver Tabla 2) fueron ingresados en el modelo construido para generar los valores simulados de calados y velocidades en el punto de medición. De igual forma se subieron los valores observados de calados y velocidades, y así se dispone en el modelo de los valores simulados y medidos, como se observa en la figura 17 (Anexo Fig. 17) del evento del 01 de enero de 2023.

Tabla 2

Eventos hidrometeorológicos seleccionados

Eventos Procesos de Calibración	Eventos Procesos de Validación
01 enero 2023 17H30-18H00	09 abril 2023 14H38-15H20
05 enero 2023 18H30-19H00	12 abril 2023 13H55-14H20
06 enero 2023 14H00-14H30	25 abril 2023 14H00-14H40
08 febrero 2023 18H00-18H40	

Nota. Eventos para calibración y validación

A pesar de que el modelo no está calibrado, se puede observar que existe una correlación aceptable en picos y volúmenes de los gráficos de calados y velocidades, y se corrobora en los indicadores estadísticos cuyos valores no están muy distantes de los recomendados. Este comportamiento se repite en los otros eventos, lo que nos revela que la información de entrada tiene un nivel de calidad y precisión acertados.

Los parámetros por modificarse en el proceso de calibración se muestran en la tabla (ver Tabla 3), al igual que los porcentajes de incertidumbre (porcentaje que se utiliza para encontrar el máximo y mínimo valor del rango que se modifica el valor del parámetro) asignados en la herramienta SRTC de PCSWMM. Tradicionalmente, el proceso de calibración consiste en variar manualmente cada parámetro y simular tantas veces hasta obtener coherencia entre los resultados simulados con los observados; sin embargo, la bondad de esta calibración depende del criterio y experiencia del modelador y diseñador, es decir, se convierte en un proceso bastante complejo, incierto y demandante de tiempo.

Luego de ejecutar la calibración, los valores de los

indicadores en los cuatro eventos (01, 05, 06 de enero y 08 de febrero de 2023) se enmarcan en los rangos recomendados, como se puede apreciar en la figura 18 (Anexo Fig. 18); de igual forma, las gráficas de calados y velocidades tienen un comportamiento temporal muy similar entre los valores simulados y medidos. Por lo que se concluye que el modelo está calibrado. Los parámetros que indicaron mayor sensibilidad fueron el ancho (width), rugosidades de áreas impermeables y permeables de subcuencas y tuberías.

Tres eventos distintos a los cuatro utilizados en la calibración fueron utilizados para la validación del modelo. La diferencia entre los dos procesos radica en que los parámetros del modelo obtenidos en la calibración no son modificados en la etapa de validación. En la figura 19 (Anexo Fig. 19) se indican los resultados de validación.

Los resultados arrojados revelan que los indicadores estadísticos poseen valores que se enmarcan en una valoración entre excelente y muy buena tanto en calado como en velocidad. Con base en los productos obtenidos se concluye que se dispone de un modelo hidráulico calibrado y validado del sistema de alcantarillado de la zona de estudio.

Tabla 3

Parámetros por modificar

Elemento	Parámetro Seleccionado	Porcentaje de Incertidumbre
Conducto	Roughness	40
	Width	100
	Slope	100
	N Imperv	50
Subcuenca	N Perv	25
	Dstore Imperv	100
	Subcatchment Zero Imperv	30

Nota. Proceso calibración.

3.4 Análisis modelo hidrodinámico 1D

Una vez que se dispone del modelo calibrado y validado, se analiza el comportamiento de la red bajo 2 escenarios:

Lluvia de diseño

Lluvias históricas, años 2017 y 2022

3.4.1 Simulaciones hidráulicas lluvias de diseño

En el numeral 4.1 se enunció que se evaluaría con la lluvia de diseño de la estación pluviométrica Quito-Observatorio de 2, 10, 25 y 50 años de períodos de retorno. La figura 20 (Anexo Fig. 20) presenta en la izquierda la vista en planta y perfil del tramo principal de la red, donde se aprecia los tramos con insuficiencia de

capacidad hidráulica y los 3 pozos con mayor inundación. Mientras que en el gráfico de la derecha se observa la vista en planta de la zona de estudio, con los tramos con sobrecarga (tuberías azul oscuro), que representa el 57% del total de

conductos. Estos resultados corresponden al período de retorno de 2 años.

En la Tabla 4 se despliega el resumen de los resultados de las simulaciones hidráulicas para los 4 períodos de retorno de lluvias de diseño. De los puntos con inundación en todos los escenarios, tres pozos tienen el mayor volumen y tiempo de inundación, su ubicación se observa en la planta de la Figura 20. De igual manera, se puede denotar que más del 50% de la red de conductos están trabajando a presión, es decir, con falta de capacidad hidráulica.

Tabla 4.

Resumen resultados de simulación hidráulica lluvias diseño

ITEM	TR	TR	TR	TR
	2años	10años	25años	50años
Volumen total inundación (m ³)	284	628	823	981
Número de pozos inundados	15	15	19	21
Volumen pozo más crítico (m ³)	113	235	303	357
Número de tuberías con insuficiencia capacidad hidráulica	71	93	97	97
Volumen descarga (m ³)	539	634	670	693

Nota. Variables hidráulicas de resultados

3.4.2 Simulaciones hidráulicas, lluvias históricas

Como se señaló en el numeral 4.1 del análisis pluviométrico, se seleccionaron 2 eventos registrados el 24 de abril de 2017 y el 31 de enero de 2022 en las estaciones Iñaquito-Inamhi y Cruz Loma,

respectivamente. En la tabla (ver Tabla 5) se despliegan los resultados. La simulación del evento registrado el 24 de abril de 2017, posee una similitud muy estrecha con los resultados generados con la lluvia de diseño correspondiente a un período de retorno de 25 años.

Tabla 5.

Resumen resultados de simulación hidráulica lluvias históricas

ITEM	24-abr-17	31-ene-22
Volumen total inundación (m³)	825	1
Número de pozos inundados	13	1
Volumen pozo más crítico (m³)	315	1
Número de tuberías con insuficiencia capacidad hidráulica	81	3
Volumen descarga (m³)	699	2884

Nota. Variables hidráulicas de resultados. Elaboración propia

A pesar de que el evento ocurrido durante todo el 31 de enero de 2022 (total 75 mm), produjo un colosal aluvión

en la zona de la av. La Gasca, debido a la gran cantidad de material que descendió de la quebrada El Tejado, la

simulación hidráulica, no refleja ningún inconveniente en la zona de estudio. No se presentan pozos de inundación ni insuficiencia de capacidad hidráulica, lo que demuestra que, para una cuenca pequeña, como la cuenca experimental, las intensidades de lluvia de corta duración y gran magnitud son las que inducen a fallas en el sistema de drenaje, mientras que, en cuencas grandes, las intensidades de mayor duración y menor intensidad son más críticas [11].

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se denotó en la presente investigación, el éxito para una gestión óptima de los sistemas de drenaje urbano (SDU) radica en un cambio de prácticas y políticas tradicionales enfocadas en actividades reactivas frente a eventos catastróficos a una gestión proactiva y preventiva, mediante el levantamiento y procesamiento de información base e implementación de modelos hidrodinámicos. Considerando lo expuesto, el objetivo principal de esta investigación es desarrollar un marco metodológico con un enfoque innovador, para diagnosticar el funcionamiento de los SDU mediante la construcción de un modelo de drenaje urbano, y su calibración y validación, de tal manera que la academia contribuya con los gobiernos municipales en la toma de decisiones para la implementación de óptimas y rentables medidas de rehabilitación, y de esta manera mejorar el nivel de servicio de esta importante infraestructura sanitaria. las principales conclusiones son:

Los tres tipos principales de información de entrada son temporal, espacial y topográfica.

Concerniente a la información temporal, se generaron lluvias de diseño provenientes de los hietogramas para diferentes períodos de retorno de la estación Quito-Observatorio. Adicionalmente, se utilizaron lluvias históricas registradas en los años 2017 y 2022, en las estaciones Ñaquito-Inamhi y Cruz Loma. Estos eventos provocaron inundaciones de gran magnitud en pasos deprimidos de la y, av. Atahualpa, plataforma gubernamental y el aluvión de La Gasca.

Referente a la información topográfica, se realizó un levantamiento LIDAR de esta zona con la finalidad de generar curvas de nivel cada metro, la ortofoto, DTM, DSM, por ende, las coordenadas tridimensionales y cotas de los pozos de la red de alcantarillado y cobertura de suelos.

El tercer tipo de información base es la espacial, específicamente el levantamiento del catastro técnico de la topología del sistema de alcantarillado. Con estos datos se construyó el modelo de drenaje en el software

PCSWMM. La red está compuesta de 96 subcuencas, 127 pozos, 126 tuberías y 1 descarga. La longitud de la red es de 1,7 km. Es menester señalar que otro beneficio de los catastros fue la identificación de anomalías de mantenimiento y daños estructurales de algunos componentes de la red, y efectuar obras de rehabilitación y reconstrucción efectivas. De igual forma se trazaron las subcuencas de aporte con sus correspondientes porcentajes de áreas impermeables y permeables y los parámetros correspondientes para el análisis de infiltración mediante el modelo de SCS número de curva.

las mediciones instantáneas cada minuto en los 4 sensores hidrometeorológicos instalados en la zona de estudio permitió disponer de información durante 10 meses de observación (enero-octubre de 2023), y luego del procesamiento y análisis respectivo se seleccionaron cuatro eventos para la calibración y tres en la validación del modelo de drenaje.

El modelo fue calibrado obteniendo coherencia de variabilidad temporal en los gráficos de calados y velocidades, y los valores de los indicadores estadísticos LSE, NSE, R2, LSE, RMSE se encuentran dentro de los rangos teóricos recomendados.

En el proceso de validación no se modificaron los parámetros del modelo obtenido en la calibración y los resultados de los indicadores estadísticos permiten concluir que el modelo está calibrado y validado.

Este modelo de drenaje urbano, que refleja el comportamiento real del sistema, se convierte en una herramienta de soporte en la toma de decisiones. Por lo cual fue utilizado para analizar su funcionamiento bajo escenarios de lluvias de diseño e históricas, y se concluye que este sistema es hidráulicamente insuficiente incluso para el período de retorno más bajo, añadiendo a esto sus deficiencias estructurales.

Se recomienda expandir esta investigación con la implementación de un nuevo paradigma de mitigación de inundaciones, que es la metodología de sistemas de drenaje sostenibles (SuDs) o sistemas basados en la naturaleza (NBS), medidas que consideran no solo aspectos de cantidad de agua, sino también calidad y biodiversidad. Se recalca que estas medidas se deben aplicar cuando se disponga de un modelo calibrado y validado [12].

Como recomendación general a las instituciones gubernamentales, municipales públicas o privadas, encargadas de la gestión de los sistemas de drenaje urbano, se debería considerar el marco metodológico planteado por la academia, el mismo que dará sustento a la toma de decisiones para el mantenimiento, rehabilitación,

rediseño, planificación de inversiones de estas importantes obras de infraestructura sanitaria, que muchas veces son ignoradas hasta que grandes impactos suceden con consecuencias funestas ambientales, económicas, de salud y hasta pérdidas humanas.

REFERENCIAS

- [1] Butler D., *Urban drainage*, third edition, London: Spon Press; 2009, pp. 3-4.
- [2] Novak P. et al., *Hydraulic modelling an introduction*, OXON, USA: Spon Press, 2010, pp. 392-394.
- [3] Waslki T. et al., *Wastewater collection. System modeling and design*. Pennsylvania: Bentley Institute Press, 2007, pp. 144-148.
- [4] Paredes D., «Hydraulic analysis of urban drainage systems with conventional solutions and sustainable technologies», *Journal of Water Management Modeling*, 2018, CHI JWMM 2018:C440.
- [5] Kleidorfer M., *Uncertain calibration of urban drainage models*, Innsbruck Austria, 2009, pp. 40-46.
- [6] eMAAP-q., *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado para la EMAAP-Q*, Quito: V&M Gráficas, 2009, p. 73.
- [7] Seyoum S., *Framework for dynamic modelling of urban floods at different topographical resolutions*. Delft, The Netherlands: Unesco-IHE, 2013, p. 32-36.
- [8] Price R., Vojinovic Z., *Urban hydroinformatics*, London: IWA Publishing, 2011, pp. 68-78.
- [9] Finney K., Gharabaghi, «Using the PCSWMM 2010 SRTC tool to design a compost biofilter for highway stormwater runoff treatment», *Journal of Water Management Modeling*, 2011, JWMM R241-09.
- [10] Gujarati, D. N., *Basic econometrics*, fourth edition, Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2003, pp. 202-250.
- [11] Vojinovic Z., Abbott M., *Flood risk and social justice*. London: IWA Publishing; 2012, pp. 275.
- [12] Pascual F., Torres M. Temprano J., Sánchez J., «Sustainable urban drainage system (sUds) modeling supporting decision-making: a systematic quantitative review», *ELSE- vier. Science of the Total Environment*, 806(2022)150447.

Anexos

Figura 6

Catastro técnico, sistema de alcantarillado



Nota. Actividades de campo.

Figura 7

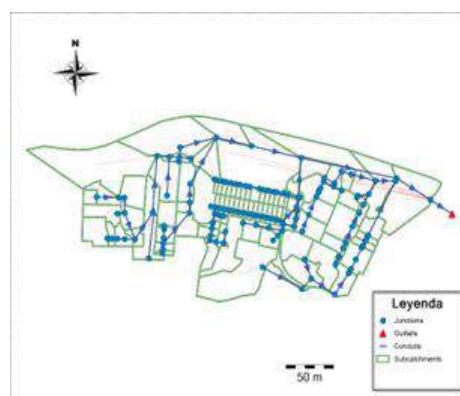
Ensayos de suelos en el área de estudio



Nota. Actividades de campo.

Figura 8.

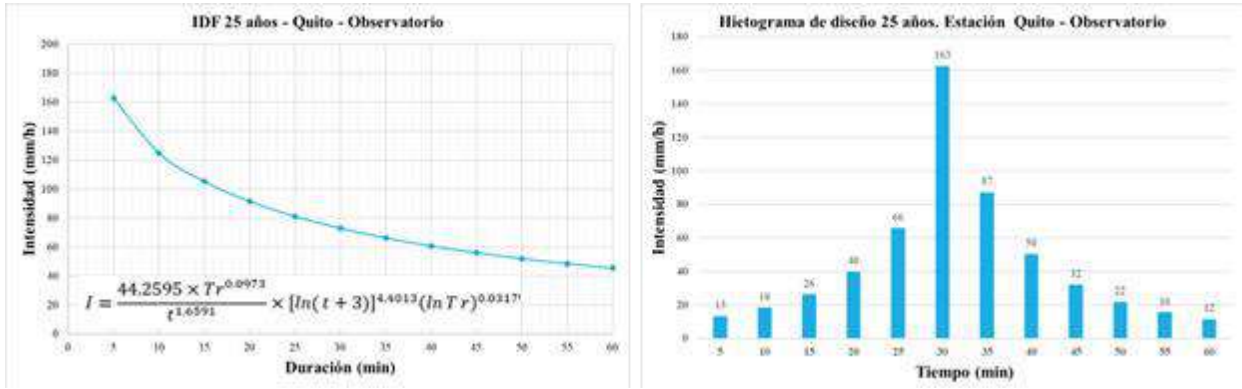
Red de drenaje del área de estudio



Nota. Modelo de drenaje urbano PCSWMM.

Figura 9.

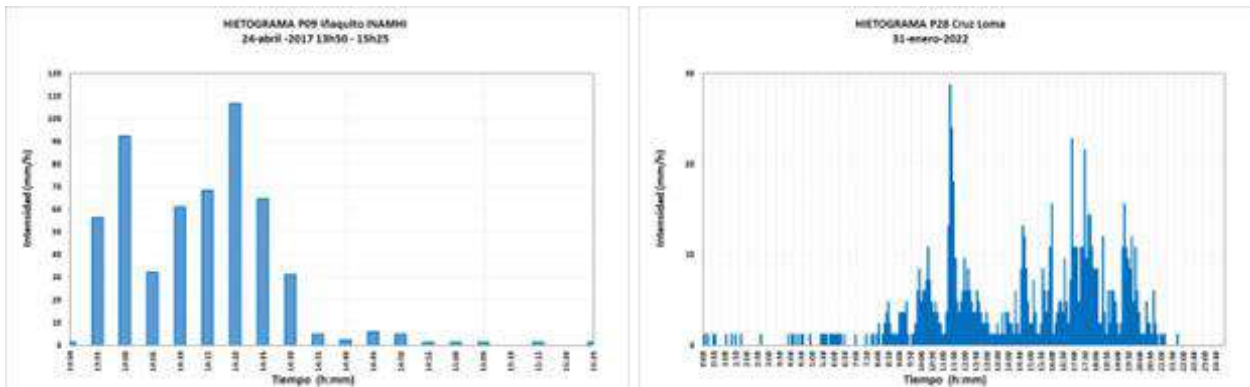
Hietograma, período de retorno de 25 años



Nota. Estación pluviométrica Quito-Observatorio.

Figura 10.

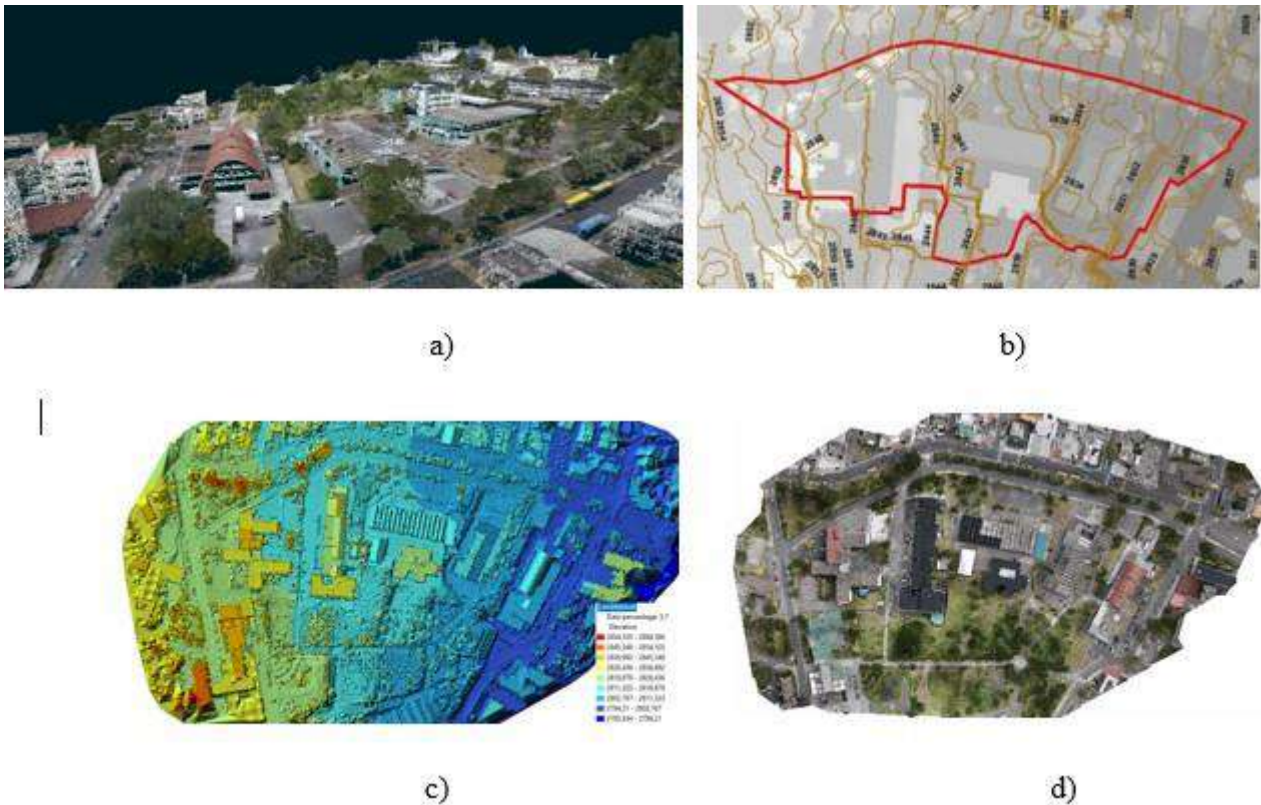
Lluvias históricas



Nota. Datos proporcionados EPMAPS. Elaboración propia.

Figura 11.

Resultados LIDAR



Nota. a) Vista 3D; b) DTM y curvas de nivel; c) Procesamiento LAS; d) Ortofoto.

Figura 12.

Puntos críticos de funcionamiento de la red



Nota. Obras de rehabilitación.

Figura 13

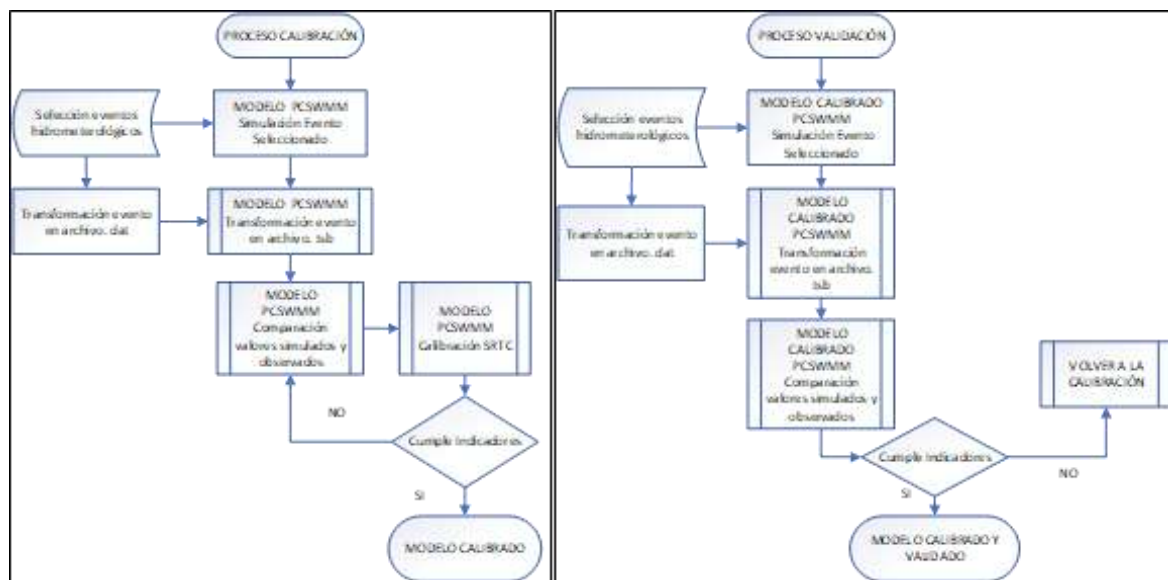
Red de drenaje y orthophoto



Nota. Modelo hidráulico de drenaje.

Figura 14

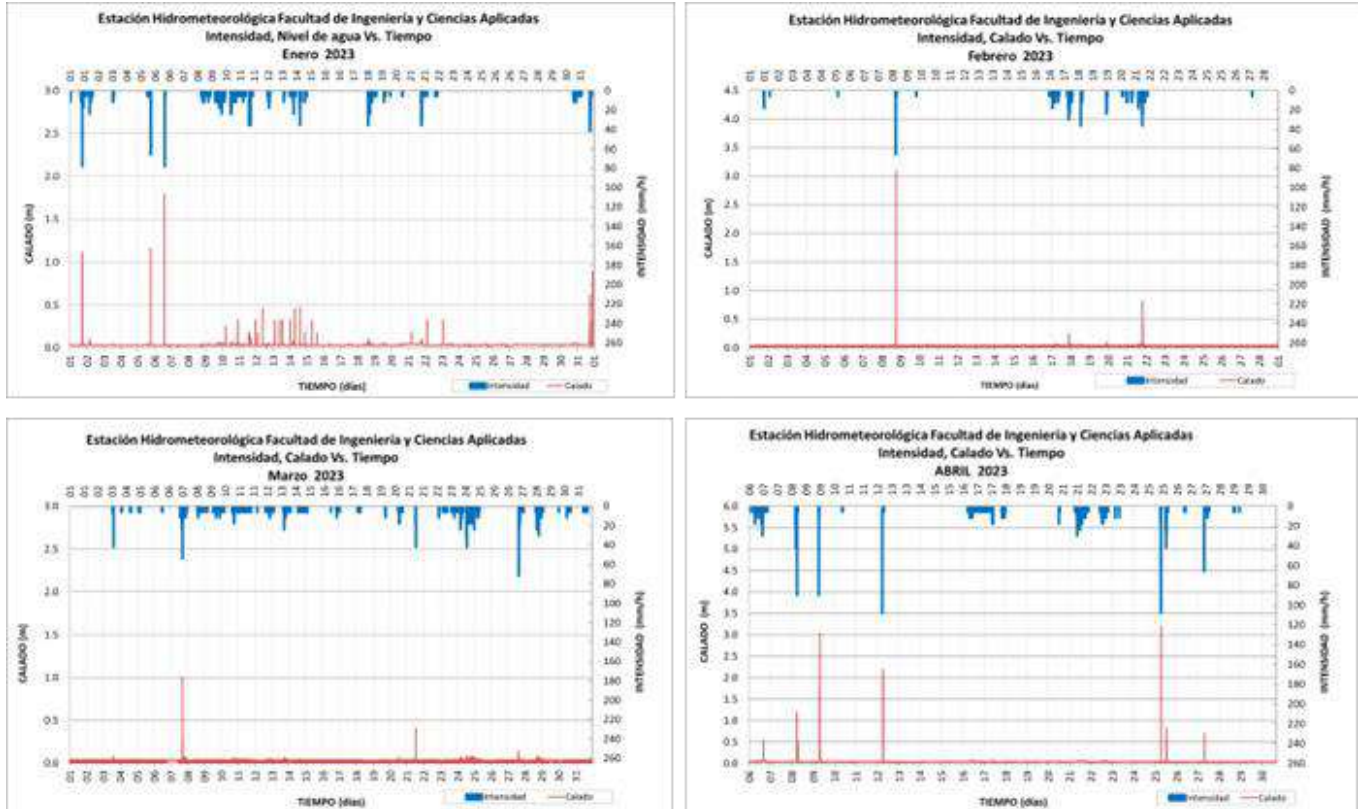
Procesos calibración y validación



Nota. Flujogramas de los procesos.

Figura 15.

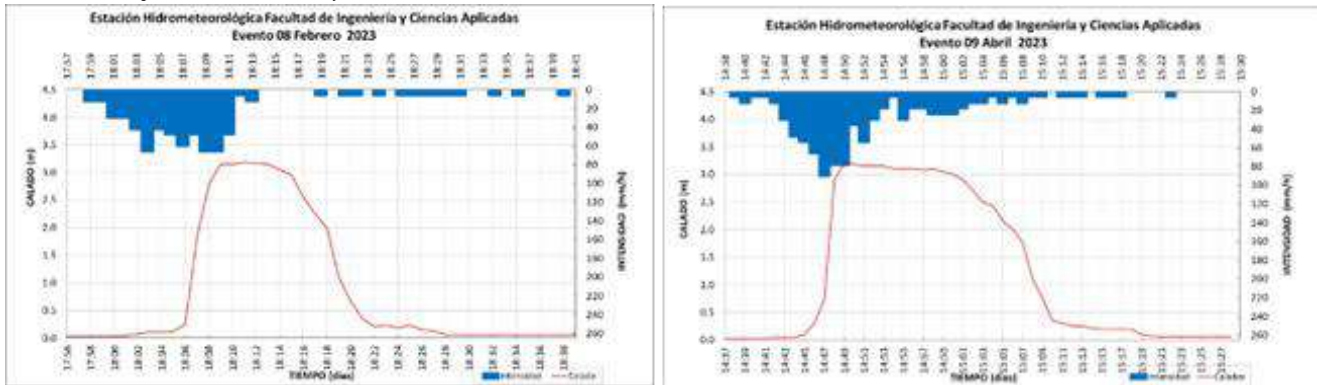
Información hidrometeorológica instantánea registrada, período enero-abril 2023



Nota. Datos registrados en la estación de la zona de estudio.

Figura 16

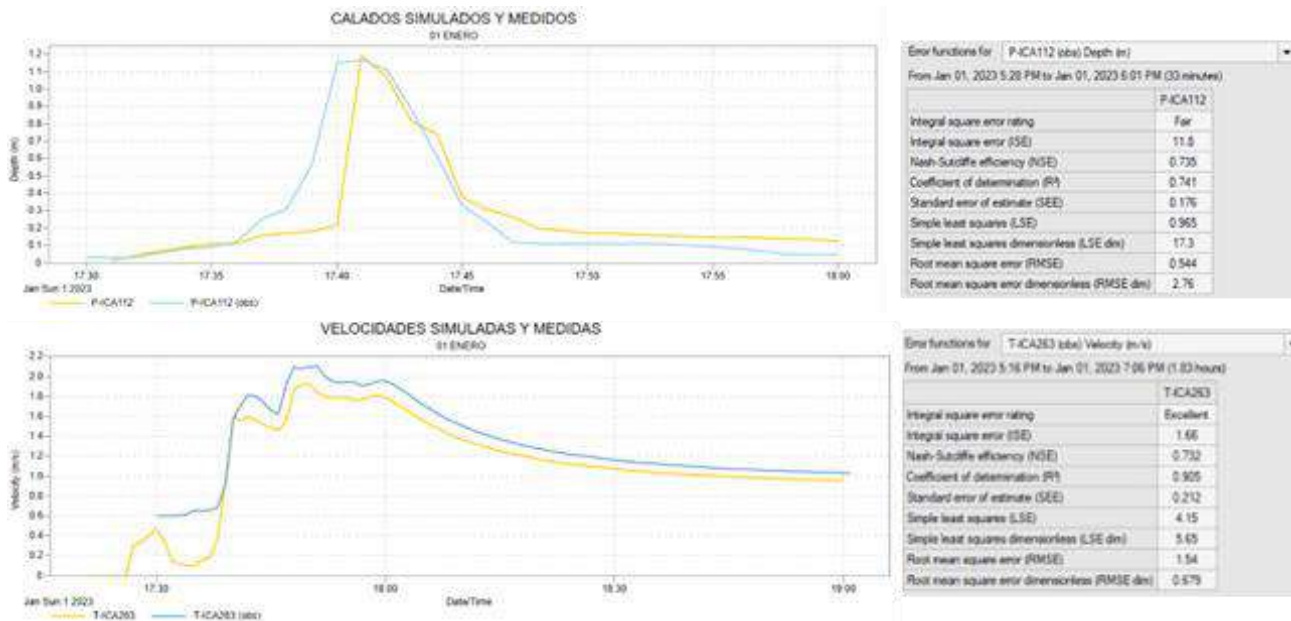
Eventos utilizados procesos calibración y validación



Nota. Un evento por cada proceso.

Figura 17

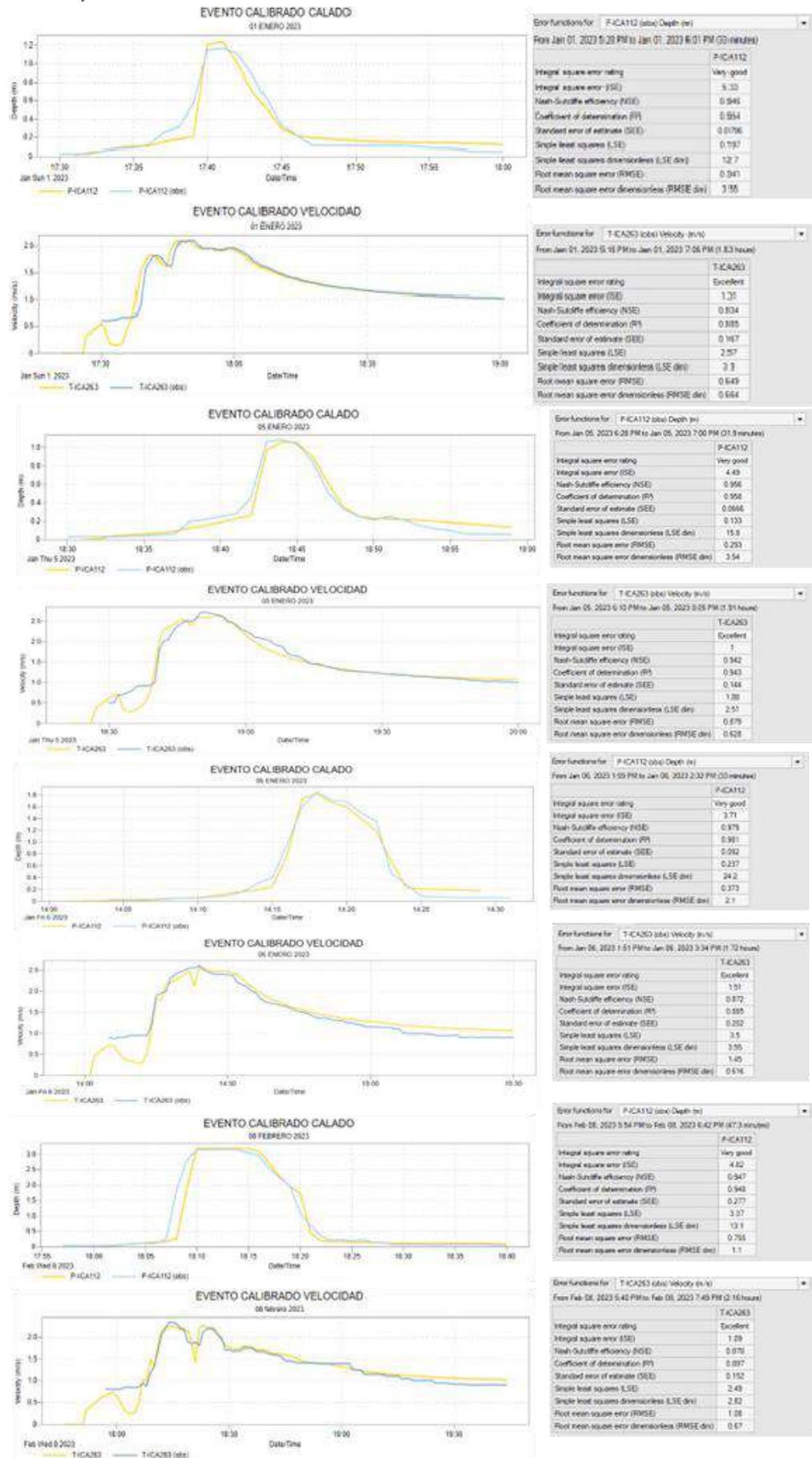
Calados, velocidades, simulados y medidos 01 enero 2023



Nota. Resultados modelo de drenaje e indicadores estadísticos.

Figura 18.

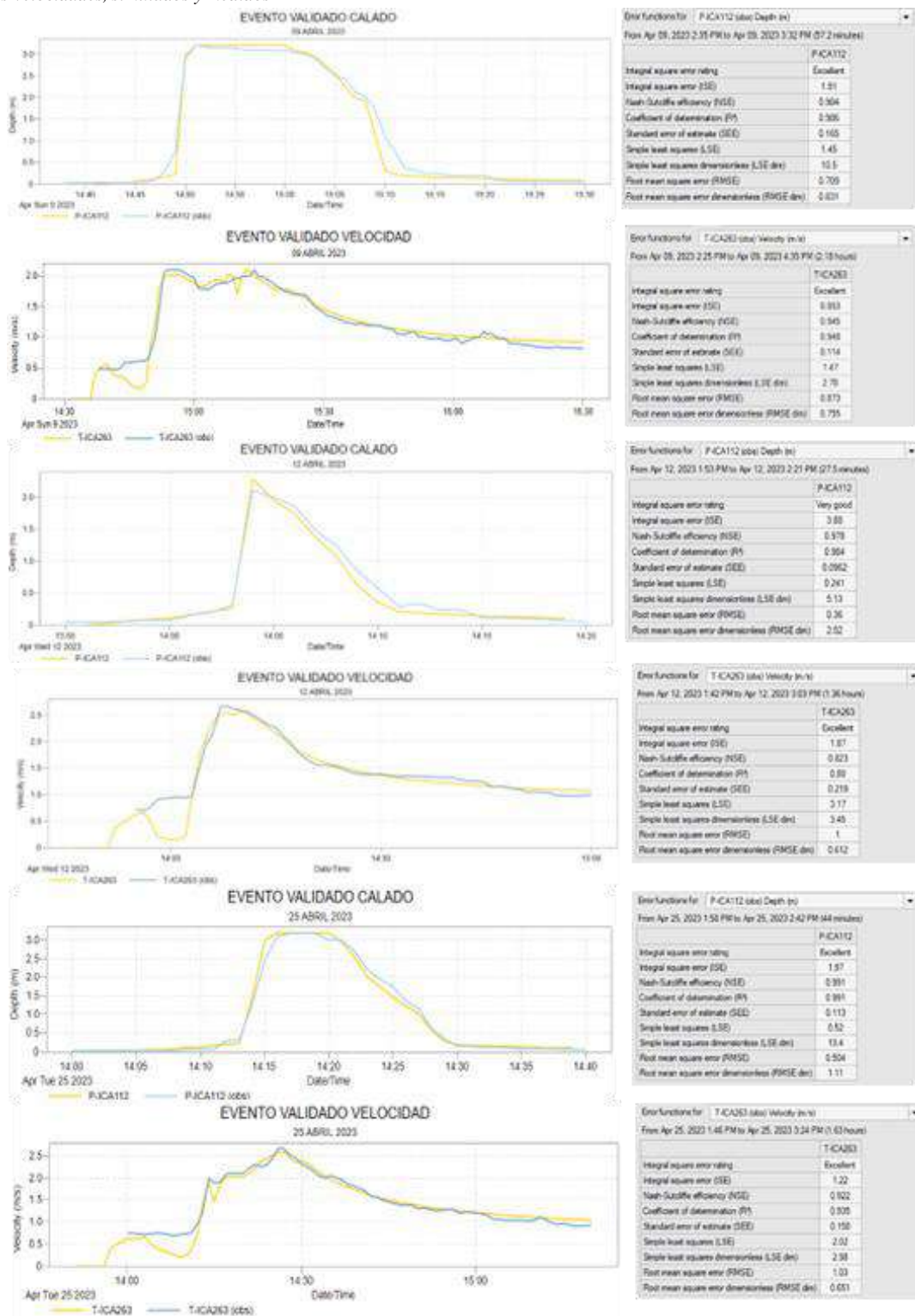
Gráficos calados-velocidades, simulados y medidos



Nota. Proceso de calibración.

Figura 19.

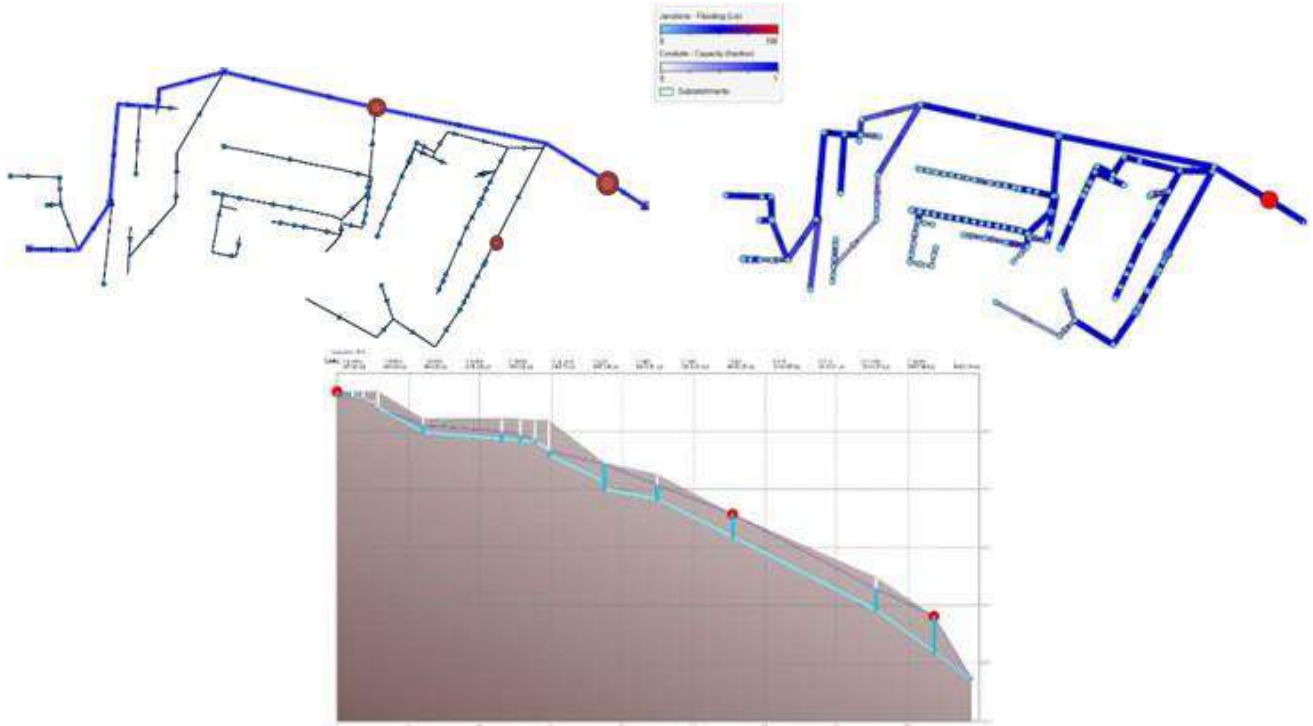
Gráficos calados-velocidades, simulados y medidos



Nota. Proceso de validación.

Figura 20.

Resultados simulación $T_r = 2$ años



Nota. Planta y perfil de resultados hidráulicos

Normas para publicar en la revista Ingenio

TÍTULOS EN DOS IDIOMAS

1. Título del artículo en tipografía *Times New Roman* tamaño 14 (cada palabra con mayúscula).
2. Título del artículo en inglés en tipografía *Times New Roman* tamaño 11.

Ejemplos:

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque.

Lorem ipsum fusce viverra massa et sem facilisis, id aliquet ex venenatis. Integer at luctus nunc. Nunc dignissim a eros sit amet sagittis.

INFORMACIÓN DE AUTORES, USO SUPERÍNDICE PARA IDENTIFICACIÓN

1. Uso del superíndice para identificación
2. Institución ante la cual se acredita el autor.
3. Dirección electrónica
4. *Open Research and Contributor ID* (ORCID)

Ejemplo:

Lorem I.;¹ Ipsum L.²

¹Universidad Lorem Ipsum (Ecuador)

loremipsum@loremipsum.org

¹Universidad Lorem Ipsum (Ecuador)

loremipsum@loremipsum.org

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

1. En fuente tamaño 9
2. (Información colocada por el editor)

Información del artículo Recibido: Lorem ipsum 2021 Aceptado: Lorem ipsum 2021
--

EXTENSIÓN DEL DOCUMENTO

1. 10.000 palabras incluidas las referencias

RESUMEN

1. 100-150 palabras

PALABRAS CLAVE

1. Justo después del resumen, mínimo cuatro.

Ejemplo:

Palabras clave: lorem, ipsum, consectetur adipiscing.

ABSTRACT

1. 50-100 words

KEYWORDS

1. Just after the abstract, minimum four.

Example:

Keywords: lorem, ipsum, consectetur adipiscing.

TEXTO PRINCIPAL

1. Texto en *Microsoft Word*
2. Columna simple
3. *Times New Roman* tamaño 11
4. Espaciado de 1,5

FIGURAS Y ECUACIONES EN EL TEXTO

- Tabla 1, Tablas 1 y 2, Tablas 1 a 3
- Fig. 1, Figs. 1 y 2, las Figs. 1 a 3
- Eq. 1, Eqs. 1 y 2, Eqs. 1 a 3

ECUACIONES

1. Úsese el editor de ecuaciones de Microsoft.
2. Número de identificación de la ecuación alineación siempre a la derecha.

Ejemplo:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} * 100 [\%] \quad (1)$$

ESTILO Y ESTRUCTURA DE LOS ENCABEZADOS

1. Solo hasta 4 niveles y 3 subniveles.

Ejemplo:

1. Lorem ipsum sit amet
2. Lorem ipsum maecenas euismod
 - 2.1 Lorem ipsum rutrum libero
 - 2.2 Lorem ipsum accumsan sagittis
 - 2.2.1 Lorem ipsum egestas tristique
3. Lorem ipsum vestibulum auctor
 - 3.1 Lorem ipsum vulputate consectetur
 - 3.2 Lorem ipsum scelerisque turpis
4. Lorem ipsum bibendum tincidunt

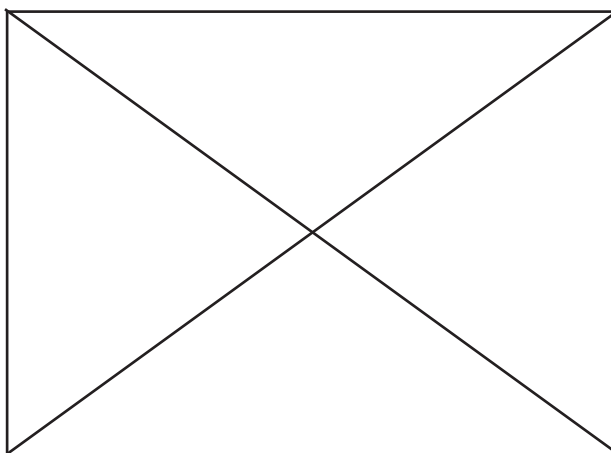
FIGURAS Y TABLAS

1. Las figuras y tablas se agregarán al final del archivo del manuscrito; no se agregarán al texto principal. La

ubicación de las figuras y tablas se exhibirá insertando sus subtítulos en el texto principal. Una vez aceptado, los archivos de figuras de alta resolución (más de 300 *dpi*, un archivo por figura) se enviarán al editor.

Figura 1.

Lorem ipsum dolor sit amet.



2. Los datos dentro de la tabla siempre alineación derecha

3. Alineado a la izquierda, usar normas APA 7ma. para la elaboración de la tabla.

Ejemplo:

Tabla 1.

Lorem ipsum dolor sit amet

LOREM IPSUM			
	LOREM IPSUM SIT	% LOREM	% IPSUM
Lorem ipsum	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123
Lorem ipsum	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123
	Lorem ipsum	123	123

Nota: Lorem ipsum consectetur. Fuente. Lorem ipsum suspendisse quis dictum velit [1].

4. Si las imágenes o tablas tienen fuente se coloca el número de su referencia entre corchetes.

Ejemplo:

Fuente. Lorem ipsum suspendisse quis dictum velit [1].

REFERENCIAS

1. Las referencias se enumerarán por orden de citación en el texto (IEEE).

Ejemplo:

[1] Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque. In eu tortor nibh. Nulla hendrerit augue accumsan sagittis scelerisque.

[2] Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque. In eu tortor nibh. Nulla hendrerit augue accumsan sagittis scelerisque.

[3] Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque. In eu tortor nibh. Nulla hendrerit augue accumsan sagittis scelerisque.

CITAS Y REFERENCIACIÓN

1. En el texto, cite cada referencia por número.

Ejemplo:

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque. Etiam mattis, ante ac pretium molestie, dolor mauris sagittis dolor, et pretium arcu dui at ipsum. Morbi egestas tristique quam. Vestibulum sit amet nisl sit amet enim vestibulum auctor por Suzana *et al.* [1].

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur vitae varius magna. Maecenas euismod rutrum libero ac scelerisque [1].

2. El estilo dependerá del tipo de referencia, pero no es necesario clasificarlo en los tipos, simplemente enumerarse por orden de citación en el texto.

Ejemplos:

ARTÍCULOS

[1] Couhert C, Salvador S, Commandré J-M. Impacto de la torrefacción en la producción de syngas a partir de madera. *Fuel* 2009; 88: 2286-2290.

CONFERENCIAS

[1] Suzana Y, Mohamad T A, Uemura Y, Anita R, Lukman I, Shuit S H, Tan K T, Lee K T. Revisión sobre la utilización de la biomasa agrícola como fuente de energía en Malasia. En: *Actas del 16º Simposio regional de la ASEAN sobre ingeniería química*, 1 y 2 de diciembre de 2009, Manila, Filipinas, págs. 86-89.

SITIO WEB

[1] MPOB (Junta de Aceite de Palma de Malasia), 2008, «6.8 Productores principales mundiales de aceite de palma: 1999 - 2008». Recuperado el 28 de enero de 2010 de http://econ.mpob.gov.my/economy/annual/stat2008/ei_world08.htm.

LIBRO

[1] Corley R H V, Tinker P B. *La palma aceitera*. 4.ª ed. Oxford: Blackwell Science; 2003, p. 328.

3. Citar correctamente, pues la información de la fuente se verificará en los buscadores especializados de contenido.

ARBITRAJE

1. REVISIONES INICIALES. Todos los manuscritos enviados y recibidos por la Revista Ingenio serán revisados por el editor interno para determinar si están preparados adecuadamente y si siguen las políticas éticas de la revista. Los manuscritos que no se ajusten a la política de ética de la revista o que no cumplan con los estándares de la revista serán rechazados antes de la revisión por pares. Los manuscritos que no estén preparados adecuadamente serán devueltos a los autores para su revisión y reenvío. Después de estas verificaciones, el editor determinará si el manuscrito se ajusta al alcance de la revista y si es científicamente sólido. En esta etapa, no se emitirá ningún juicio sobre el impacto potencial del trabajo. Las decisiones de rechazo en esta etapa serán verificadas por el editor. El número de autores o firmantes no debe ser superior a cinco, considerando al primero como autor principal del artículo. Dicho manuscrito será un documento formal, público, controlado y debe cumplir con los criterios claves de redacción.

2. REVISIÓN POR PARES. Una vez que un manuscrito pase las comprobaciones iniciales, se asignará al menos a dos expertos independientes para su revisión por pares. Se aplica una revisión a doble ciego, donde los revisores no conocen las identidades de los autores y viceversa. Los comentarios de la revisión por pares son confidenciales y solo se divulgarán con el acuerdo expreso del revisor.

En el caso de presentaciones regulares, los editores asistentes internos invitarán a expertos, acorde a las recomendaciones del editor. Estos expertos también pueden incluir miembros del consejo editorial y editores invitados de la revista.

También se pueden considerar los posibles revisores sugeridos por los autores siempre y cuando no hayan trabajado ni colaborado con los autores o coautores los últimos cinco años.

3. DECISIÓN EDITORIAL Y REVISIÓN. Todos los artículos, revisiones y comunicaciones publicados en la revista Ingenio pasan por el proceso de revisión por pares y reciben al menos dos rúbricas. El editor comunicará la decisión de los pares, que será una de las siguientes:

[a] *Aceptar luego de realizar correcciones menores* (en principio, el documento se acepta después de la revisión basada en los comentarios del revisor. Los autores tienen quince días para revisiones menores).

[b] *Reconsiderar después de realizar correcciones importantes* (la aceptación del manuscrito dependería de las revisiones. El autor debe proporcionar una respuesta punto por punto o proporcionar una refutación si algunos de los comentarios del revisor no se pueden revisar. Por lo general, solo se permite una ronda de revisiones importantes. Se pedirá a los autores que vuelvan a enviar el artículo revisado dentro de un período de tiempo adecuado, y la versión revisada se devolverá al revisor para obtener más comentarios).

[c] *Rechazar y promover el reenvío* (si se necesita reforzar el método o elementos experimentales adicionales para respaldar las conclusiones, el manuscrito será rechazado y se alentará a los autores a volver a enviar el artículo una vez que se hayan realizado más experimentos).

[d] *Rechazar* (el artículo tiene serios defectos o no hace una contribución significativa original. No se ofrece ninguna oferta de reenvío a la revista).

Todos los comentarios de los revisores deben ser respondidos punto por punto. Cuando los autores no estén de acuerdo con un revisor, deben proporcionar una respuesta clara.

4. APELACIONES DEL AUTOR. Los autores pueden apelar un rechazo enviando un correo electrónico a la revista Ingenio. La apelación debe proporcionar una justificación detallada, incluidas las respuestas punto por punto a los comentarios de los revisores o del editor. Se le pedirá al consejo editor consultado que dé una recomendación de asesoramiento sobre el manuscrito y puede recomendar la aceptación, una revisión por pares adicional o mantener la decisión de rechazo original. Una decisión de rechazo en esta etapa es definitiva y no se puede revertir.

5. PRODUCCIÓN Y PUBLICACIÓN. Una vez aceptado, el manuscrito se someterá a corrección de estilo profesional, edición, revisión por parte de los autores, correcciones finales, paginación y publicación en el sitio web de la revista acorde a la periodicidad.

ANTIPLAGIO

1. Todos los artículos recibidos por la revista Ingenio serán sometidos a un control antiplagio utilizando diversas herramientas, que analiza los textos en busca de coincidencias gramaticales y orto tipográficas, lo que garantiza que los trabajos sean inéditos.

