

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

VI

**JORNADAS DE
INVESTIGACIÓN
DE LA FACULTAD
DE INGENIERÍA**

2024





UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



Facultad de
Ingeniería



Instituto de
Investigaciones
en Ingeniería

Memoria de conferencias de las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería

23, 24 y 25 de octubre de 2024

PERSONAS EDITORAS

Orlando Arrieta-Orozco

Víctor Schmidt-Díaz

Luis Manuel Zamora-González

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Instituto de Investigaciones en Ingeniería

INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA EDITORIAL DEL VOLUMEN ESPECIAL

IEEE:

- [1] O. Arrieta-Orozco, L. M. Zamora-González, and V. Schmidt-Díaz, Eds., “VI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2024”. En *Revista Ingeniería*, Volumen 35 NE5. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2025, pp 1-183. Doi 10.15517/ri.v35iNE5.63450.

APA:

Arrieta-Orozco, Zamora-González, & Schmidt-Díaz, V. (Eds). (2025). V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2023. En *Revista Ingeniería*, Volumen 35 NE5 (pp 1-183). Universidad de Costa Rica. Doi: 10.15517/ri.v35iNE5.63450.

Diseño de portada: Diana Catalina Quirós Murillo

Diagramación: Melissa González Villalobos.

CEDAA - INII - FI

TABLA DE CONTENIDOS

Presentación	V
Acerca de este Volumen Especial de la Revista de Ingeniería	VII
Acerca de las personas editoras de este Volumen Especial	IX
 Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental	 1
Evaluación de hidrocarburos modificados con hierro como catalizadores para la oxidación avanzada de pesticidas	2
Índice de Calidad Ambiental Urbana para Costa Rica: Implementación y hallazgos	11
Control Anticipativo para la Mitigación de Perturbaciones en un Aerogenerador de Alta Potencia	19
Herramienta de código abierto para el diseño de Sistemas Fotovoltaicos con Baterías.....	29
Optimización y gestión de datos para el transporte público	39
Recolección en tiempo real de datos de telemetría y rastreo en el transporte público	40
Estudio de la información del servicio de transporte público en Costa Rica	48
Concentrador de datos en tiempo real para servicios de información en el transporte público	57
Sistema de información para las personas usuarias del transporte público en Costa Rica.....	67
Avances en la robótica e inteligencia artificial	76
Estimación de múltiples puntos de contacto y la proporción de fuerza aplicada para verificación de actividades manipulativas realizadas con el cuerpo completo del robot humanoide	77
Adaptación de una máquina de control numérico computarizado (CNC) para su uso como estación de traslación automatizada	86
Transformers Unidos: Eficacia De los Modelos Ensemble-ViT en Clasificación Automática de Flora Costarricense	93
Ciencias de datos	101
Modelado autorregresivo y dinámico de tasas de interés para el BBCR	102
New-flow Based Attack Mitigation in Software-Defined Resource-Constrained Networks	110
Análisis Comparativo de un Potenciostato de Bajo Costo Basado en Arduino	120
Educación y Sistemas de Información Geográfica	128
Centro Experimental de Procesamiento SIRGAS, Universidad de Costa Rica.	129
Implementación de prácticas artísticas contemporáneas en la pedagogía de estudiantes de arquitectura	137
Novedades estructurales, construcción e inspección	145
Diseño de compensadores de adelanto de fase para ensayos RTHS	146
Ruido sísmico y actividad antropogénica: caso de estudio de un edificio alto durante la pandemia.....	154
Análisis de indicadores de condición para priorización de intervención de puentes de Costa Rica	162
Marcos con riostras intencionalmente excéntricas de sección W y HSS redondas	169
Modelos 3D para la implementación de la metodología BIM en Patrimonio Arquitectónico	177

PRESENTACIÓN

Esta publicación corresponde a las ponencias presentadas en las VI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería (6JIFI), organizadas anualmente por la decanatura de la Facultad y la dirección del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) desde el año 2019. En ellas, docentes, investigadores y estudiantes de la Facultad presentan resultados y avances de investigación.

El lema de las 6JIFI fue “La ingeniería, la arquitectura y la informática en el mejoramiento de procesos y diseños orientados a la conservación del entorno”, y las ponencias se agruparon en diferentes temas:

- Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental
- Optimización y gestión de datos para el transporte público
- Avances en la robótica y la inteligencia artificial
- Sistemas de Información Geográfica
- Ciencias de datos
- Novedades estructurales, construcción e inspección
- Educación

Después de la convocatoria y el envío de ponencias, se realizó un proceso de revisión que incluyó aspectos de formato, plagio, impacto y calidad, entre otros; todas fueron evaluadas por al menos dos pares externos al grupo organizador. De las 27 ponencias enviadas, 23 fueron aprobadas y presentadas en las 6JIFI. Estas correspondían a investigaciones en donde tenían participación diferentes escuelas (Administración de Negocios (1), Arquitectura (1), Ciencias de la Computación e Informática (1), Ingeniería Civil (5), Ingeniería Eléctrica (11), Ingeniería en Biosistemas (1), Ingeniería Mecánica (1), Ingeniería Química (1), Ingeniería Topográfica (3) y Química (1)) y laboratorios (CERLab (1), Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica (1), Laboratorio de Telecomunicaciones (1) y LANAMME (1)), un centro (CIEDES (1)) y un instituto (INII (5)); todas realizadas por estudiantes, docentes e investigadores en conjunto o de forma individual, y en varios casos, con la colaboración de universidades extranjeras.

Las 6JIFI se realizaron los días 24 y 25 de octubre del año 2024 en el Miniauditorio 1 de la Facultad de Ingeniería, agrupando las ponencias en 6 sesiones según la temática, y se contó con la colaboración, como moderadores, de representantes de varias escuelas y de miembros de la organización.

La ponencia inaugural titulada “Modelación sectorial para informar políticas públicas alineadas a la conservación del entorno” fue presentada por la Ing. Mariana Rodríguez Arce MSc. de Climate Lead Group; y la mesa redonda final sobre aportes a la sostenibilidad, fue moderada por el Ing. Orlando Arrieta Orozco, Ph.D., decano de la Facultad de Ingeniería, y tuvo como participantes a la Ing. Alejandra Rojas González Ph.D., docente, investigadora y directora de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, a la Arq. Emily Vargas Ph.D., docente e investigadora de la Escuela de

Arquitectura, y al Biol. Gilbert Alvarado Barboza Ph.D., docente, investigador y subdirector de la Escuela de Biología.

En la mesa redonda se trató la sostenibilidad desde la formación de cada uno de los participantes y sus principales investigaciones orientadas a los procesos y los diseños para la conservación del entorno. Además, se comentó sobre la conformación de grupos de personas investigadoras de diferentes áreas para lograrlo, la incorporación de los sectores externos a la Universidad para obtener una mayor proyección, y cómo han difundido sus aportes hacia la sociedad, para finalmente discutir sobre los desafíos para conservar el entorno.

Es importante destacar a las Jornadas de Investigación como un espacio para mostrar los temas que se investigan en la Facultad de Ingeniería desde diferentes aristas, contribuyendo a la sociedad, protegiendo el ambiente e impulsando el desarrollo.

Editores del volumen especial:

Dr. Orlando Arrita Orozco. Decano, Facultad de Ingeniería.

Dr. Víctor Schmidt Díaz. Director, Instituto de Investigaciones en Ingeniería.

Ing. Luis Manuel Zamora González. Docente e investigador, Escuela de Ingeniería Civil.

ACERCA DE ESTE VOLUMEN ESPECIAL DE LA REVISTA INGENIERÍA

Es una memoria de las VI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, en la que se exponen las 23 ponencias que aprobaron las revisiones de pares, de formato y de plagio. Las jornadas se desarrollaron de forma presencial, los días 23, 24 y 25 de octubre de 2024.

Revisión de pares

Todas las ponencias enviadas para participar en las VI Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería fueron revisadas y evaluadas por al menos dos pares externos al grupo organizador. Ellas y ellos pertenecen a universidades e instituciones extranjeras y nacionales, a empresas nacionales y extranjeras, y a consultores nacionales. Algunos han sido pares de la Revista Ingeniería.

A las ponencias presentadas no se les aplicó la evaluación de pares académicos que se estipula en la Revista Ingeniería para artículos científicos, sino una evaluación elaborada exclusivamente para las Jornadas de Investigación que incluyó aspectos de calidad, innovación, pertinencia, relevancia, impacto, entre otros.

Revisión de formato

Algunos de los lineamientos verificados en el formato de las ponencias por las y los representantes de cada una de las unidades académicas de la Facultad de Ingeniería fueron:

- Un máximo de 7 páginas.
- Resumen de máximo 200 palabras.
- La ponencia compuesta como mínimo de las siguientes secciones: introducción, metodología o métodos, resultados, discusión, conclusiones y referencias.
- Uso del sistema de referencias del manual del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Originalidad, claridad y precisión en la redacción para su facilidad de comprensión de acuerdo con el público multidisciplinar del evento.

Listado de las y los representantes de las unidades académicas de la Facultad de Ingeniería:

Escuela de Arquitectura (EA)	Dr. Olmán Hernández Ureña
Escuela de Ingeniería en Biosistemas (EIB)	Dra. Marianela Alfaro Santamaría
Escuela de Ciencias de la Computación e Informática (ECCI)	Dr. Allan Berrocal Rojas
Escuela de Ingeniería Civil (EIC)	M.Sc. Alejandro Navas Carro
Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE)	Dr. José David Rojas Fernández Dr. Diego Dumani Jarquín Ing. Helber Meneses Navarro
Escuela de Ingeniería Industrial (EII)	Dra. Johanna Méndez Arias
Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM)	Ing. Juan Gabriel Monge Gapper

Escuela de Ingeniería Química (EIQ)	Ing. Allan Mora Vindas
Escuela de Ingeniería Topográfica (EIT)	M.Sc. Alexander Cerdas Hernández Dr. Mauricio Varela Sánchez

Descargo imágenes

Es posible que la calidad de las imágenes expuestas en este volumen especial no sea la adecuada. En ese sentido se aclara que la contribución es exclusiva responsabilidad de las personas autoras participantes.

Plagio

Se realizó una revisión de las ponencias aquí expuestas utilizando la plataforma Turnitin, y en ninguno de los textos se detectó el plagio.

ACERCA DE LAS PERSONAS EDITORAS DE ESTE VOLUMEN ESPECIAL

Dr. Orlando Arrieta Orozco

Orlando Arrieta Orozco recibió los títulos de Bachiller y Licenciado en Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Costa Rica, en 2003 y 2006 respectivamente. En 2007 obtiene el grado de Máster en Ingeniería de Sistemas y Automática y en 2010 el de Doctor, ambos por la Universidad Autónoma de Barcelona, España, en el campo de Ingeniería de Control, donde también realiza luego un periodo postdoctoral. En el 2015 obtiene además el grado de Maestría en Administración con énfasis en Gerencia, de la Universidad de Costa Rica. Es profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica e investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería. Actualmente es Decano de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Costa Rica.

Dr. Víctor Schmidt Díaz.

Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad de Costa Rica. Máster y Doctor en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España. El doctorado además lo obtuvo con Mención Europea, gracias a una pasantía realizada en el Instituto NORSAR en Noruega. Actualmente es investigador del Laboratorio de Ingeniería Sísmica, docente de grado y del programa de posgrado de la Escuela de Ingeniería Civil. Es el actual director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica

Ing. Luis Manuel Zamora González

Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad de Costa Rica. Egresado de la Maestría Interdisciplinaria en Gestión Ambiental y Ecoturismo de la Universidad de Costa Rica. Actualmente es docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Civil.

Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental

Evaluación de hidrocarbones modificados con hierro como catalizadores para la oxidación avanzada de pesticidas

Evaluation of iron-modified hydrochars as catalysts for the advanced oxidation of pesticides

Esteban Durán Herrera

Profesor catedrático, Escuela de Ingeniería Química, UCR

e-mail: esteban.duranherrera@ucr.ac.cr

Carmen Sans Mazón

Profesora catedrática, Departamento de Ingeniería Química y Química Analítica,

Facultad de Química, Universitat de Barcelona

e-mail: carmesans@ub.edu

Palabras clave:

Carbonización hidrotérmica, catálisis heterogénea, contaminantes emergentes, Fenton, persulfato.

Keywords:

Emerging contaminants, Fenton, heterogeneous catalysis, hydrothermal carbonization, persulfate.

RESUMEN

Se evaluó el desempeño de catalizadores basados en hidrocarbón modificado con hierro (Fe^{3+} y Fe^0) en la degradación de pesticidas en agua utilizando los procesos de oxidación avanzada de Fenton y de persulfato. Los catalizadores se sintetizaron mediante un proceso hidrotérmico utilizando desechos de poda de vid, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ y Fe^0 como precursores. El hidrocarbón con Fe^{3+} presentó buena actividad en ambos procesos de oxidación (degradaciones $\sim 50\%$), mientras que el de Fe^0 se desempeñó excelentemente en la oxidación con persulfato (degradaciones $\sim 97\%$). Los catalizadores desarrollados sugieren ser eficientes y su uso permitiría valorizar desechos biomásicos en favor de una economía circular.

ABSTRACT

The performance of catalysts based on iron-modified hydrochar (Fe^{3+} and Fe^0) was evaluated in the degradation of pesticides in water using Fenton and persulfate advanced oxidation processes. The catalysts were synthesized by a hydrothermal process using vine pruning waste, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ and Fe^0 as precursors. The Fe^{3+} -hydrochar presented good activity in both oxidation processes (degradations $\sim 50\%$), while the Fe^0 -hydrochar performed outstandingly in the oxidation with persulfate (degradations $\sim 97\%$). The developed catalysts suggest being efficient and their use would allow the valorization of biomass wastes in favor of a circular economy.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el crecimiento social y económico de todos los pueblos, por lo que es imperativo que se gestione de acuerdo con los Objetivos para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas [1] de manera que no se favorezca el desarrollo económico a expensas de la degradación ambiental. La descontaminación de aguas de diversas fuentes es uno de los principales retos en este ámbito, sobre todo debido a la detección cada vez más frecuente de un tipo de contaminantes, denominados emergentes, los cuales son particularmente peligrosos y resistentes a los procesos de tratamiento y purificación de agua hasta ahora utilizados [2]. Algunos ejemplos de estos contaminantes emergentes son los productos farmacéuticos para uso humano y veterinario (antibióticos, analgésicos y antiinflamatorios, psiquiátricos, antiepilépticos, reguladores lipídicos, B-bloqueantes, esteroides, hormonas, etc.), surfactantes, pesticidas, antisépticos, cosméticos, retardantes de llama y artículos de limpieza y aseo personal. Entre estos, los pesticidas han recibido una atención especial debido a su alta toxicidad y persistencia en el ambiente, sus propiedades de bioacumulación y los efectos perjudiciales que causan a la salud humana tales como cáncer, infertilidad, malformaciones y cambios cromosómicos [3].

La alta estabilidad de estos contaminantes emergentes, así como su baja biodegradabilidad hacen que los tratamientos biológicos y/o físicoquímicos tradicionales no provean una solución óptima para su eliminación [2]. Ante esto, los procesos de oxidación avanzada (AOPs, por sus siglas en inglés) presentan una solución de tratamiento efectiva, ya que de ser aplicados adecuadamente logran degradar estos contaminantes de manera rápida y eficiente, pudiéndolos inclusive mineralizar hasta CO_2 , H_2O , y minerales [4]. Los AOPs se definen como procesos de tratamiento basados en la generación de radicales (principalmente hidroxilo), los cuales producen la destrucción oxidativa de los compuestos orgánicos. No obstante, el costo de estos procesos es alto, ya que requieren de insumos como químicos oxidantes (peróxido de hidrógeno, persulfato, ozono), radiación ultravioleta, energía eléctrica, etc., de ahí que el desarrollo de catalizadores que hagan estos procesos más eficientes, y por ende más económicos, es de gran relevancia.

Dos de los OAPs más estudiados en la degradación de contaminantes emergentes utilizan peróxido de hidrógeno y persulfato como agentes oxidantes para la generación de los radicales (hidroxilo y sulfato). Estas reacciones deben ser activadas (catalizadas) por diversos agentes como por ejemplo radiación ultravioleta, ultrasonido, o iones metálicos. En los casos en que la activación es mediante iones de hierro, a los procesos se les conoce como Fenton (ecuaciones 1 y 2) y persulfato activado por hierro (ecuaciones 3 y 4).





Estos procesos se pueden llevar a cabo en fase homogénea adicionando soluciones de iones Fe^{2+} y/o Fe^{3+} , o bien, partículas de hierro cero valente (Fe^0), ya que estas pueden liberar gradualmente hierro ferroso en el agua [5]. Sin embargo, se han encontrado ventajas (por ejemplo, la reducción en la formación de lodos y la operación a pH más neutros) si los iones hierro (Fe^{2+} y/o Fe^{3+}), o bien las partículas de hierro cero valente (Fe^0), se inmovilizan en un soporte sólido para llevar a cabo las reacciones de oxidación en presencia de un catalizador heterogéneo [5], [6]. Como materiales de soporte se han estudiado, entre otros, carbón activado, sílica, alúmina, arcillas, zeolitas, estructuras metal-orgánicas, grafeno, y recientemente biocarbón e hidrocarbón [6], [7], [8].

El hidrocarbón es un material carbonoso que se obtiene de la carbonización hidrotérmica de biomasa (seca o húmeda) tratada con agua a temperaturas subcríticas (180-240 °C) en un reactor bajo presión autógena (2-10 MPa). Éste se caracteriza por ser poco poroso, mayoritariamente ácido, tener un área de superficie específica baja, un contenido de carbono total entre 58–64 % en peso y poseer una gran cantidad de grupos funcionales oxigenados en su superficie [9], lo cual le da características únicas como soporte catalítico. Además, dado que el hidrocarbón se puede producir utilizando una variedad de biomásas ampliamente disponibles (incluidos desechos agrícolas, lodos de depuradora, estiércol y algas) y que las condiciones del proceso de carbonización hidrotérmica son muy favorables, la sostenibilidad de los productos derivados de hidrocarbón está garantizada en términos de abastecimiento de materias primas, consumo de energía y gestión de residuos [10].

El objetivo de esta investigación fue realizar una evaluación preliminar del desempeño de los catalizadores sintetizados a partir del soporte de hierro (Fe^{3+} y Fe^0) sobre hidrocarbón producido de desechos de la poda de plantas de vid, al ser utilizados en la activación de los procesos de oxidación avanzada de Fenton y de persulfato con el fin de degradar pesticidas en una matriz acuosa. De esta manera se explora la posibilidad de obtener catalizadores de bajo costo que permitan purificar de manera más eficiente las aguas contaminadas con contaminantes emergentes y a su vez valorizar desechos biomásicos en favor de una economía circular.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales y reactivos químicos.

Los desechos de poda de vid (sarmientos) se recogieron en un viñedo de la región del Penedès en Barcelona, España. Después de lavarlos tres veces con agua desionizada, los sarmientos se secaron a 70 °C durante 24 h y se cortaron en trozos pequeños de 10 mm de longitud. Estas piezas se trituraron en un molino de anillo pulverizador (RS 100, Retsch GmbH, Alemania), se pasaron a través de un tamiz de 250 μm y se almacenaron para su uso posterior. El desempeño de los catalizadores se evaluó utilizando una mezcla modelo preparada con agua desionizada y cinco pesticidas: clotianidina (CTD), acetamiprid (ACE), ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), metalaxil

(MET) y atrazina (ATZ). Todos los reactivos químicos utilizados fueron de calidad analítica y se obtuvieron de Merck (Darmstadt, Alemania) o Panreac Química (Barcelona, España).

B. Método analítico.

La concentración de todos los pesticidas se determinó realizando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) según el método desarrollado por Durán *et al.* [11].

C. Preparación de los catalizadores

Se prepararon dos catalizadores de hierro (uno de Fe^{3+} y otro de Fe^0) soportado sobre hidrocarbón mediante un método hidrotérmico de un solo recipiente (one-pot hydrothermal synthesis). Para la preparación del catalizador con Fe^{3+} se mezclaron 5,0 g del polvo de biomasa seca con 50 mL de una solución 0,9 M de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$ en el vaso de politetrafluoroetileno de 100 ml de un reactor de autoclave hidrotérmico (CGOLDENWALL, China). Luego, el reactor se calentó en un horno a una tasa de 5 °C/min hasta la temperatura de reacción de 200 °C. Después de 2 h de reacción, el reactor se enfrió hasta temperatura ambiente (25 °C). El catalizador obtenido se filtró al vacío, se lavó con agua desionizada hasta obtener un filtrado incoloro, se secó a 85 °C y finalmente se molió utilizando mortero y pistilo. A este catalizador se le denominó $\text{Fe}^{3+}\text{-HC}$. Para preparar el catalizador de Fe^0 se siguió el mismo procedimiento excepto que inicialmente se mezclaron 5,0 g del polvo de biomasa seca, 0,5 g de Fe^0 y 50 mL de agua desionizada. A este segundo catalizador se le denominó $\text{Fe}^0\text{-HC}$. También se preparó hidrocarbón sin la adición de hierro para comparar su desempeño; para ello se mezcló 5,0 g del polvo de biomasa seca con 50 mL de agua desionizada y se siguió el procedimiento de síntesis hidrotérmica anteriormente descrito. A este catalizador se le denominó HC.

D. Desempeño de los catalizadores

Para evaluar el desempeño de los catalizadores se pusieron 48 mg del material en contacto con 60 mL de una solución con los cinco pesticidas modelo (concentración 20 μM cada uno) por un lapso de 60 min para llegar a condiciones de equilibrio de adsorción, ajustándose el pH a 3,0 utilizando HCl o NaOH (0,1M). Luego de este lapso se tomaron muestras para cuantificar la reducción en las concentraciones de los pesticidas debido a la adsorción. Posteriormente, se adicionó la cantidad de agente oxidante (H_2O_2 o $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) necesaria para alcanzar una concentración 5 mM y se extrajeron muestras a lo largo de 60 min para estudiar la cinética de degradación de los pesticidas; se utilizó Na_2SO_3 para detener la reacción en las muestras extraídas. Los datos cinéticos se ajustaron al modelo de Chan y Chu [12], el cual describe adecuadamente los comportamientos típicos de degradación en los procesos de Fenton y persulfato:

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \frac{t}{p + \sigma t} \quad (5)$$

donde C es la concentración del pesticida a un tiempo de reacción t , C_0 es su concentración inicial y p y σ son constantes cinéticas que se pueden asociar a la tasa de eliminación inicial ($1/p$) y a la capacidad máxima de oxidación ($1/\sigma$).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que el proceso de reacción estudiado es mediante catálisis heterogénea, es importante analizar primero el comportamiento de adsorción que tienen los pesticidas en los materiales sintetizados. En la Fig.1 se presentan los porcentajes de remoción que experimentaron los pesticidas en cada material luego de 1 h de contacto previo la adición de los agentes oxidantes. El pesticida que más se adsorbió en los materiales fue el 2,4-D, llegando a prácticamente un 25 % de adsorción tanto en el HC, como en el Fe^{3+} -HC y un 14 % en el Fe^0 -HC. Los otros pesticidas se adsorbieron en promedio un 11 % en el HC, 2 % en el Fe^{3+} -HC y 12 % en el Fe^0 -HC, indicando que al pH de trabajo, el Fe^{3+} -HC es el material que menor afinidad de adsorción presenta.

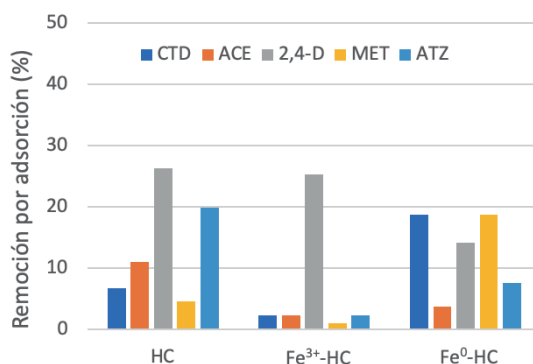


Fig. 1. Remoción de los pesticidas por adsorción en los materiales catalíticos. ([Pesticidas]₀ = 20 μM , [Catalizadores]₀ = 0,8 g/L, pH = 3)

Una vez que se adicionaban los agentes oxidantes fue posible cuantificar la degradación que sufrían los pesticidas debido a la reacción de oxidación avanzada catalizada por cada material. En la Fig. 2 se muestran los perfiles de concentración de cada pesticida a lo largo del tiempo de reacción obtenidos para cada uno de los tres catalizadores evaluados, tanto para el proceso de Fenton, como para el de persulfato. En la Fig. 2 (a) y (d) se puede apreciar como la degradación de los pesticidas es baja en ambos procesos de oxidación cuando el catalizador utilizado fue el HC, obteniéndose en promedio un 15 % de degradación con el proceso de Fenton y un 23 % con el de persulfato. En el caso del catalizador Fe^{3+} -HC, se obtienen mayores degradaciones para todos los pesticidas en ambos procesos de oxidación avanzada y fue evidente las diferentes velocidades de reacción de cada pesticida (ver Fig. 2 (b) y (e)). En el caso del proceso Fenton, las velocidades de reacción mostraron el siguiente orden $\text{ACE} < \text{ATZ} < \text{CTD} < 2,4\text{-D} < \text{MET}$, el cual concuerda con los valores relativos de las constantes de velocidad de reacción de cada molécula con el radical OH reportadas en la literatura [13], [14],

[15]. En el caso del proceso con persulfato, el orden fue similar, diferenciándose únicamente en que el 2,4-D tuvo una velocidad de degradación muy similar a la CTD. En este proceso de oxidación las degradaciones de ATZ, CTD y MET fueron mayores que las logradas con Fenton, aumentando por ejemplo la de MET 17 puntos porcentuales llegando a un 82 %, mientras que las de ACE y 2,4-D fueron ligeramente más bajas (en promedio disminuyeron 6 puntos porcentuales). La Fig. 2 (c) y (f) muestra el desempeño obtenido con el catalizador $\text{Fe}^0\text{-HC}$, observándose que para el proceso de Fenton las degradaciones de los pesticidas están entre un 13 % y un 31 % y para el proceso con persulfato se obtuvieron degradaciones entre 86 % y 100 %, las más altas de todos los casos estudiados. Estos resultados evidencian que este catalizador es muy eficiente para el proceso de oxidación de pesticidas con persulfato, alcanzándose altas degradaciones en tan solo 10 min de reacción.

En general, los catalizadores evaluados presentaron mejores rendimientos cuando se utilizó persulfato como agente oxidante. Por otro lado, se pudo constatar que dentro de los pesticidas estudiados, el ACE y el MET son respectivamente el más y menos recalcitrante.

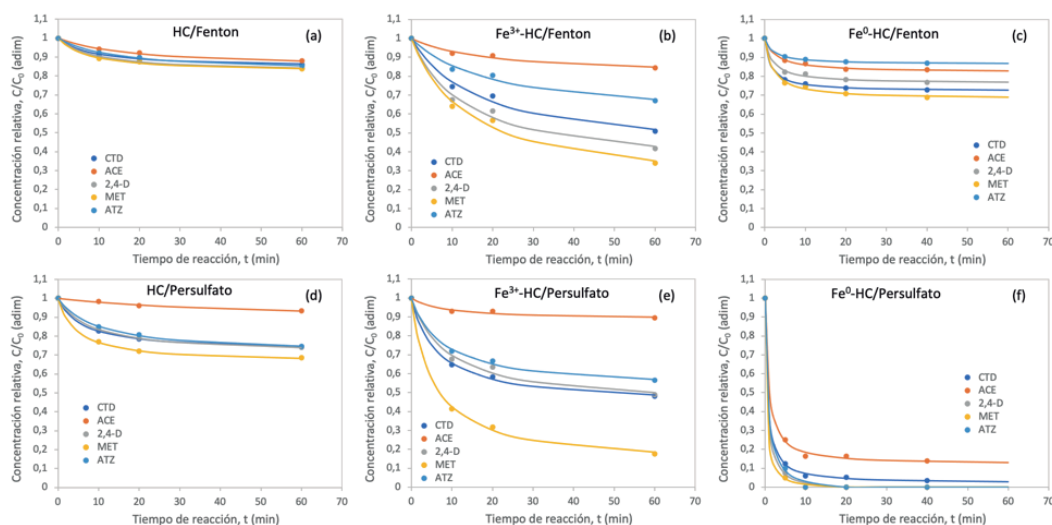


Fig. 2. Degradación de los pesticidas debido a la reacción de oxidación con H_2O_2 (Fenton) y persulfato utilizando los catalizadores desarrollados. Los puntos son los datos experimentales y las líneas el modelo cinético ajustado. ([Pesticidas] $_0$ = 20 μM , [H_2O_2] $_0$ = [Persulfato] $_0$ = 5 mM, [Catalizadores] = 0,8 g/L, pH = 3)

Para cada uno de los experimentos realizados, se procedió a calcular los parámetros cinéticos de acuerdo al ajuste de los datos experimentales al modelo de Chan y Chu (Ec. (5)). Este modelo cinético representa muy bien el comportamiento típico de degradaciones realizadas mediante los procesos de Fenton y persulfato, en las cuales es común tener un decrecimiento brusco en la concentración de los contaminantes al inicio del proceso y luego una reducción paulatina, pero a una velocidad mucho menor, hasta estabilizarse en un valor final. En el Cuadro I se presentan los resultados de los parámetros p y σ obtenidos junto con sus correspondientes coeficientes de determinación (R^2) y en la Fig. 2 se puede apreciar las líneas de ajuste del modelo para cada corrida experimental. Al analizar los resultados se puede concluir que el modelo describe bastante bien la cinética de las reacciones.

CUADRO I.
CONSTANTES CINÉTICAS DE LA DEGRADACIÓN DE LOS PESTICIDAS.

		HC						Fe ³⁺ -HC						Fe ⁰ -HC					
Fenton	ρ	CTD	ACE	2,4-D	MET	ATZ	CTD	ACE	2,4-D	MET	ATZ	CTD	ACE	2,4-D	MET	ATZ	R ²	σ	R ²
		53,4	118	49,5	40,5	77,6	27,3	96,4	19,2	17,6	46,2	5,39	15,9	8,28	6,34	15,5			
		6,49	6,39	5,53	5,57	5,54	1,62	4,97	1,43	1,25	2,32	3,56	5,54	4,19	3,11	7,33			
		0,992	0,997	0,994	0,995	0,997	0,988	0,980	0,989	0,990	0,985	0,9998	0,995	0,994	0,997	0,9999			
Persulfato	ρ	21,7	408	27,0	13,7	33,7	11,4	71,8	15,6	6,15	16,5	0,582	0,912	0,493	0,303	0,623	R ²	σ	R ²
		3,58	7,97	3,40	2,93	3,40	1,76	8,81	1,74	1,12	2,05	1,02	1,13	0,975	0,985	0,969			
		0,99998	0,986	0,9999	0,9998	0,999	0,998	0,962	0,989	0,999	0,996	0,9996	0,999	0,999	0,9996	0,998			

CONCLUSIONES

Luego de realizar la evaluación preliminar de los hidrocarburos sintetizados en su aplicación como catalizadores de los procesos de Fenton y persulfato para la degradación de pesticidas, se dedujeron las siguientes conclusiones:

- El HC presenta baja actividad (degradaciones $\sim 20\%$) en ambos procesos de oxidación, el Fe^{3+} -HC presenta una mejor actividad en ambos procesos (degradaciones $\sim 50\%$), mientras que el Fe^0 -HC presentó baja actividad en el proceso Fenton (degradaciones $\sim 20\%$) pero un excelente desempeño en la oxidación con persulfato (degradaciones $\sim 97\%$).
- El proceso de oxidación con persulfato fue más efectivo que con H_2O_2 al usarse los catalizadores de hidrocarbón sintetizados en este estudio.
- El ACE y el MET fueron respectivamente el más y menos recalcitrante de los pesticidas estudiados.
- El modelo de Chan y Chu describe adecuadamente las cinéticas de reacción obtenidas.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas, “Objetivos de Desarrollo Sostenible,” <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. (accedido en May. 20, 2024).
- [2] O. M. Rodriguez-Narvaez, J. M. Peralta-Hernandez, A. Goonetilleke, and E. R. Bandala, “Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 323, pp. 361–380, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.cej.2017.04.106.
- [3] R. M. de Souza, D. Seibert, H. B. Quesada, F. de Jesus Bassetti, M. R. Fagundes-Klen, and R. Bergamasco, “Occurrence, impacts and general aspects of pesticides in surface water: A review,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 135, pp. 22–37, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.psep.2019.12.035.
- [4] M. Preethi, S. P. Shanmugavel, G. Kumar, Y. K. N. M. Gunasekaran, and R. J. Banu, “Recent progress in mineralization of emerging contaminants by advanced oxidation process: A review,” *Environmental Pollution*, vol. 341, p. 122842, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2023.122842.
- [5] Y. Gao, P. Champagne, D. Blair, O. He, and T. Song, “Activated persulfate by iron-based materials used for refractory organics degradation: a review,” *Water Science and Technology*, vol. 81, no. 5, pp. 853–875, Mar. 2020, doi: 10.2166/wst.2020.190.
- [6] M. Azfar Shaida et al., “Critical analysis of the role of various iron-based heterogeneous catalysts for advanced oxidation processes: A state of the art review,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 374, p. 121259, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.121259.
- [7] A. D. Gupta, H. Singh, S. Varjani, M. K. Awasthi, B. S. Giri, and A. Pandey, “A critical review on biochar-based catalysts for the abatement of toxic pollutants from water via advanced oxidation processes (AOPs),” *Science of The Total Environment*, vol. 849, p. 157831, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157831.
- [8] C. Liang, W. Zhao, Z. Song, and S. Xing, “Influence of precursor pH on the structure and photo-Fenton performance of Fe/hydrochar,” *RSC Advances*, vol. 7, no. 56, pp. 35257–35264, 2017, doi: 10.1039/C7RA06194C.

- [9] S. Masoumi, V. B. Borugadda, S. Nanda, and A. K. Dalai, "Hydrochar: A review on its production technologies and applications," *Catalysts*, vol. 11, no. 8, p. 939, Aug. 2021, doi: 10.3390/catal11080939.
- [10] L. P. Padhye, E. R. Bandala, B. Wijesiri, A. Goonetilleke, and N. Bolan, "Hydrochar: A Promising Step Towards Achieving a Circular Economy and Sustainable Development Goals," *Frontiers in Chemical Engineering*, vol. 4, Apr. 2022, doi: 10.3389/fceng.2022.867228.
- [11] J. E. Duran, B. Bayarri, and C. Sans, "Taguchi optimisation of the synthesis of vine-pruning-waste hydrochar as potential adsorbent for pesticides in water," *Bioresource Technology*, vol. 399, p. 130552, May 2024, doi: 10.1016/j.biortech.2024.130552.
- [12] K. H. Chan and W. Chu, "Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine," *Chemosphere*, vol. 51, no. 4, pp. 305–311, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0045-6535(02)00812-3.
- [13] L. Wojnárovits and E. Takács, "Rate coefficients of hydroxyl radical reactions with pesticide molecules and related compounds: A review," *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 96, pp. 120–134, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.radphyschem.2013.09.003.
- [14] F. J. Real, J. L. Acero, F. J. Benitez, and E. Matamoros, "Elimination of neonicotinoids by ozone-based advanced oxidation processes: Kinetics and performance in real water matrices," *Separation and Purification Technology*, vol. 301, p. 121975, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.seppur.2022.121975.
- [15] J. L. Acero, K. Stemmler, and U. von Gunten, "Degradation Kinetics of Atrazine and Its Degradation Products with Ozone and OH Radicals: A Predictive Tool for Drinking Water Treatment," *Environmental Science & Technology*, vol. 34, no. 4, pp. 591–597, Feb. 2000, doi: 10.1021/es990724e.

Índice de Calidad Ambiental Urbana para Costa Rica: Implementación y hallazgos

Urban Environmental Quality Index for Costa Rica: Implementation and findings

Ing. Karen Isabel Araya Vega

Egresada, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR

e-mail: karen.arayavega@ucr.ac.cr

Ing. Bárbara Quirós Solano

Egresada, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR

e-mail: barbara.quiros@ucr.ac.cr

Dra. Karla Barrantes Chaves

Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR

e-mail: karla.barrantes@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Calidad ambiental urbana, desarrollo sostenible, ICAU, índice, planificación urbana.

Keywords:

Index, sustainable development, urban environmental quality, UEQI, urban planning.

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo la generación de un Índice de Calidad Ambiental urbana (ICAU) basado en el cumplimiento del objetivo 11 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ‘Ciudades y Comunidades Sostenibles’, según los indicadores propuestos para Costa Rica y aplicados a los cantones de Escazú y Cartago. Para lo cual se utilizó información secundaria de instituciones nacionales y gobiernos locales, así como producción de algunos insumos mediante técnicas cartográficas y de teledetección. Para obtención del índice se realizó la selección de indicadores, normalización de los datos, ponderación de la información y agregación de la información. Los resultados muestran la distribución espacial del ICAU en los cantones de estudio en una escala del 0 al 100, y visibilizan un cumplimiento limitado del objetivo 11. Este trabajo brinda a los gobiernos locales una herramienta para monitorear su calidad ambiental urbana, la cual es replicable a otros cantones urbanos y permite reflexionar sobre la necesidad de contar con información actualizada y accesible para la toma de decisiones.

ABSTRACT

This research aims to develop an Urban Environmental Quality Index (UEQI) based on goal 11 of the Sustainable Development Goals (SDGs) ‘Sustainable Cities and Communities’, according to the Costa

Rican proposed indicators, applied to Escazú and Cartago cantons. For this purpose, secondary information from national institutions and local governments was used, as well as the production of some inputs using cartographic and remote sensing techniques. The index development carried out the following steps: indicator selection, data normalization, information weighting, and information aggregation. The results show a spatial distribution of the UEQI in the study cantons on a scale from 0 to 100; it highlights a limited fulfilment of goal 11 there. This work provides local governments with a tool to monitor their urban environmental quality, which is replicable to other urban cantons and allows reflection on the need for updated and accessible information for decision-making.

I. INTRODUCCIÓN

La calidad ambiental urbana es un término complejo que relaciona factores ambientales y humanos, así como diferentes escalas de análisis que van desde análisis locales a regionales [1]. Este concepto engloba aspectos tales como disponibilidad de espacios públicos, movilidad, vivienda, servicios públicos, temperatura superficial, entre otros factores que inciden en la calidad de vida de un determinado territorio [1], [2]. El presente trabajo busca generar un Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU) para monitorear este aspecto en territorios costarricenses.

Los procesos de urbanización impactan la calidad ambiental del espacio urbano, según el contexto, estos procesos se pueden traducir en procesos de renovación urbana que mejoran la provisión y calidad de espacios públicos. Sin embargo, la realidad latinoamericana presenta situaciones donde el modelo de baja densidad ha generado ciudades dispersas que complican la provisión de servicios de calidad, por otra parte, la falta de políticas públicas para las zonas rurales ha incrementado la migración hacia centros urbanos que no necesariamente tienen las condiciones para recibir a la nueva población, incrementando la demanda de vivienda y muchas veces también la informalidad [3]. En el Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica, el desarrollo urbano de los últimos 30 años ha provocado un agotamiento de las tierras urbanizables dentro del anillo de contención de la GAM [4], ante la escasez de zonas apropiadas para la construcción, es fundamental un crecimiento eficiente que aproveche los espacios disponibles y articule servicios públicos, movilidad, áreas verdes y vivienda.

La distribución justa de los recursos del planeta es un desafío que se plantea dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que parten de la agenda 2030 de la Organización de Naciones Unidas, cuyo marco de referencia busca asegurar la sostenibilidad ambiental y garantizar los derechos humanos de las personas mediante el cumplimiento de 17 objetivos. Para lograr estas metas, los 193 países miembros de las Naciones Unidas deben establecer sus indicadores para monitorear su cumplimiento. El objetivo 11 ‘Ciudades y Comunidades Sostenibles’ busca que los territorios sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles [5], en el caso de Costa Rica se establecieron 14 indicadores para realizar ese monitoreo. Esta investigación se basa en una selección de los indicadores del Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible para Costa Rica que se relacionan con el campo de la calidad ambiental urbana según el trabajo de Araya y Quirós [6], para así establecer un Índice de Calidad Ambiental Urbana (ICAU) y aplicarlo a los cantones de Escazú y Cartago.

El propósito del ICAU es brindar a los gobiernos locales una herramienta de monitoreo del cumplimiento de los indicadores del objetivo 11 relacionados al campo de la calidad ambiental

urbana, que permita conocer necesidades de mejora que posibiliten disfrutar un espacio urbano de calidad, reducir los procesos de exclusión y mejorar la calidad ambiental del territorio.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la obtención del índice abarcó las siguientes etapas: La **selección de indicadores** se llevó a cabo mediante la inclusión de indicadores acordes a la realidad nacional e internacional considerando las metas e indicadores para el cumplimiento del ODS 11 que estén ligadas al término de calidad ambiental urbana. Asimismo, se utilizaron diversos criterios tales como representatividad, confiabilidad, disponibilidad, relevancia y comparabilidad para satisfacer el objetivo planteado, donde dichos indicadores se dividieron en dos dimensiones: ambiental y humano. Los indicadores seleccionados de la dimensión ambiental son: vegetación urbana, área urbanizada, espacios públicos y temperatura superficial terrestre. Los relacionados con la dimensión humana son: consumo de agua potable, acceso a agua potable, consumo de energía eléctrica, acceso a energía eléctrica, proximidad a paradas de transporte público y densidad poblacional. Los datos para la construcción del índice se recolectaron por medio de instituciones nacionales, gobiernos locales y la aplicación de técnicas cartográficas y de teledetección para la obtención de insumos relacionados al análisis del servicio de transporte público y, estudio de la cobertura del suelo y su temperatura.

Dado que los indicadores presentaban distintas unidades de medidas requirieron la **normalización de los datos**, por medio de un escalamiento lineal para evitar la aparición de fenómenos dependientes de la escala. Asimismo, se opta por definir parámetros máximos y mínimos para la aplicación del método de estandarización escogido.

Posteriormente, se establecieron criterios de análisis de sostenibilidad para la **ponderación de la información**, de acuerdo con el cumplimiento de dichos criterios y a la dimensión se le otorgó un peso distinto. A la dimensión ambiental se le otorgó un peso de 3 y a la dimensión humana un peso de 2, en caso de no cumplir con ningún criterio, independientemente de su dimensión se le otorga un peso de 1 para no perder la identidad de los valores normalizados.

Por último, se realizó la **agregación de la información** y se obtuvo la siguiente fórmula:

$$ICAU = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

x_i : valor normalizado del indicador

w_i : peso del indicador según criterio de análisis de sostenibilidad

$\sum_{i=1}^N w_i$: Total de la suma de los pesos.

Con los datos obtenidos se produjo una serie de mapas que permitió la visualización del índice de calidad ambiental urbana desagregado por la Unidad Geoestadística Mínima (UGM) y a nivel distrital.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Relación entre indicadores

Parte fundamental de los hallazgos fue la identificación de relaciones entre indicadores, se resalta la relación entre temperatura superficial terrestre con la vegetación urbana y área urbanizada, debido a que las altas temperaturas predominan en las áreas con mayor área urbanizada y a su vez con menos cobertura de vegetación urbana, lo que influye en la presencia de islas de calor. En la Fig. 1, se observa de color rojo las islas de calor, donde en el cantón de Escazú las temperaturas rondan entre $28,40^{\circ}\text{C}$ y $31,25^{\circ}\text{C}$, y se ubican principalmente en el centro de cada distrito. En el caso del cantón de Cartago, las temperaturas están entre $26,00^{\circ}\text{C}$ y $30,24^{\circ}\text{C}$, y se concentran en los distritos que componen el centro del cantón.

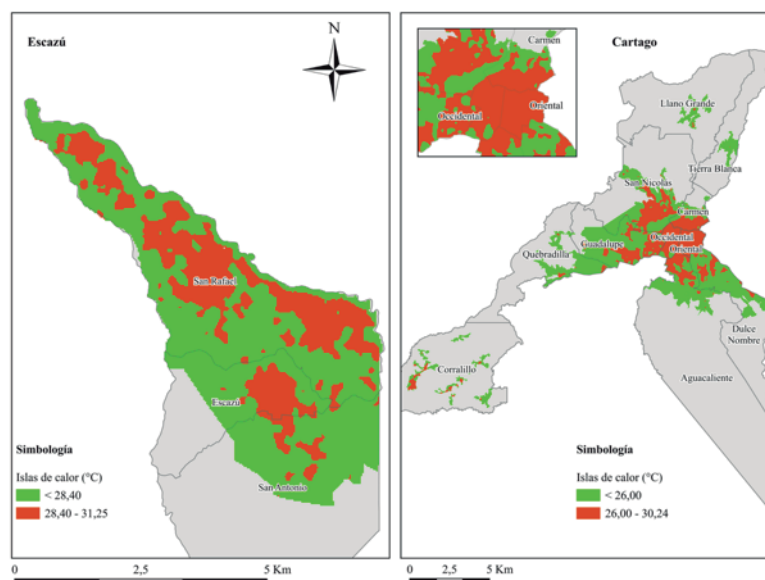


Fig. 1. Islas de calor de la zona urbana en el cantón de Escazú y Cartago

En relación con lo anterior, en la Fig. 2 se aprecia la distribución de la cobertura de área urbanizada y vegetación urbana, en las cuales se encuentra una coincidencia respecto a la zonas donde se concentran las temperaturas más altas de ambos cantones, por lo que el efecto de islas de calor podría incidir negativamente en la salud de los residentes y demás habitantes que se desempeñan en dichas áreas urbanas, así como problemas medio ambientales debido a la insuficiencia de espacios verdes y demás elementos naturales que contribuyen al enfriamiento de la superficie terrestre y del aire [7] , [8]. Fig. 2. Distribución de vegetación urbana y área urbanizada de la zona urbana en el cantón de Escazú y Cartago.

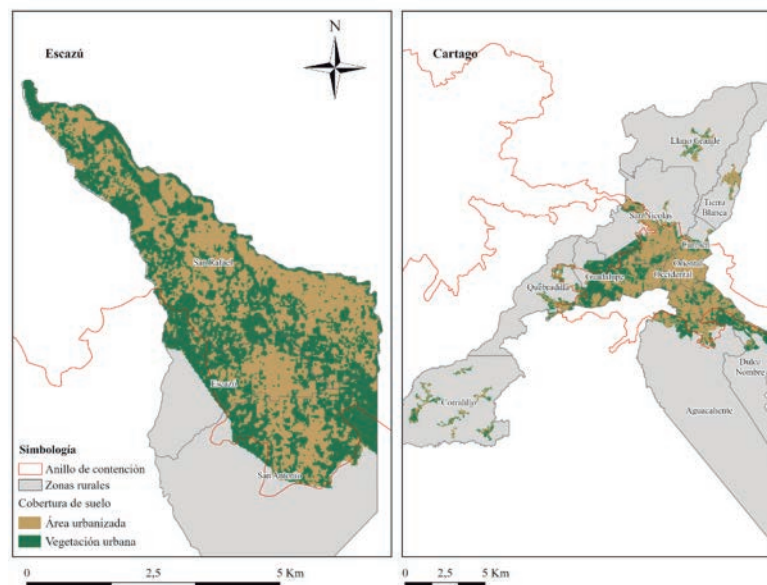


Fig. 2. Distribución de vegetación urbana y área urbanizada de la zona urbana en el cantón de Escazú y Cartago

Asimismo, se identificó una destacable relación entre los indicadores de área urbanizada y densidad poblacional, donde el modelo de baja densidad incide en la dispersión de las construcciones lo que implica a su vez el agotamiento de la vegetación, un recurso que es complejo de renovar. Con respecto a este último indicador de densidad poblacional hubo una tendencia a cumplir con los parámetros establecidos inicialmente basados en la teoría, que señalan que una baja densidad puede afectar en el uso eficiente de la ciudad, donde por ejemplo se ve un impacto en aspectos como consumo de energía eléctrica al haber un mayor consumo de dicho servicio y transporte público por el aumento de las distancias de traslado, lo que fomenta el uso vehículo particular [9].

Por lo anterior, es de suma importancia optar por densidades compactas con la utilización de construcciones verticales, así como implementar medidas para la conservación y protección de la vegetación en las zonas urbanas y aplicación de tecnologías de construcción sostenible para el control de las altas temperaturas.

B. Resultados del ICAU

A nivel cantonal la calidad ambiental urbana en las zonas de estudio fue regular y mala, al obtener puntuaciones de 28 a 58, en una escala de 0 a 100. Aquellos distritos con una calidad ambiental mala no cumplieron con los criterios de los indicadores ambientales, lo que demuestra que estos influyen considerablemente en la calificación del ICAU.

En el cantón de Escazú, dos de sus distritos: Escazú y San Rafael, obtuvieron una calidad ambiental urbana mala, con una puntuación de 37 y 28 respectivamente, mientras el distrito de San Antonio obtuvo la calificación más alta con 41 puntos, lo que representa una calidad ambiental urbana regular.

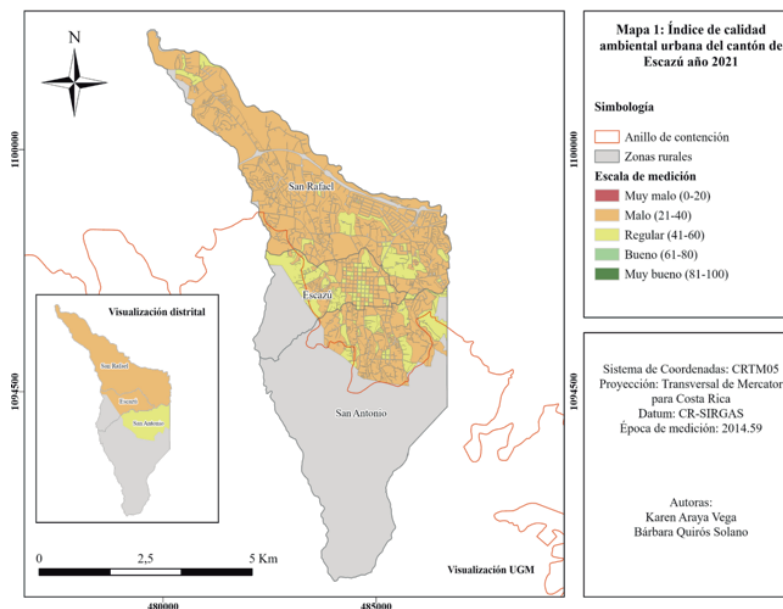


Fig. 3. Mapa 1. Índice de calidad ambiental urbana del cantón de Escazú

En el cantón de Cartago, el ICAU obtuvo de 37 a 46 puntos, específicamente nueve de sus once distritos obtuvieron una calidad ambiental urbana regular con puntuaciones entre 46 y 58. Los dos restantes correspondientes a Oriental y Occidental, obtuvieron una puntuación de 37 y 39 respectivamente, por ende, presentan una calidad ambiental urbana mala.

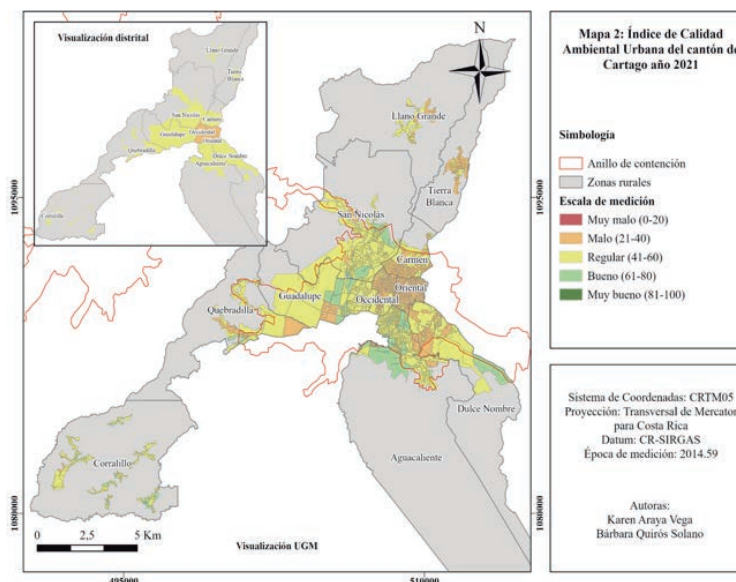


Fig.4. Mapa 2. Índice de calidad ambiental urbana del cantón de Cartago

En general a nivel comparativo, el distrito de San Rafael obtiene la puntuación más baja de los cantones y en el caso contrario es el distrito de Guadalupe con el puntaje más alto, el cual estuvo

muy cercano a alcanzar una buena calidad ambiental urbana al obtener 58 puntos. Con respecto a los resultados de las UGM, existe una homogeneización según al distrito que pertenecen, sin embargo, se presentan algunas UGM del cantón de Cartago en el rango de valores para una calidad ambiental urbana buena, lo que permite focalizar zonas que requieren intervención según el grado de deterioro de la calidad ambiental urbana.

C. Aplicabilidad del ICAU

El ICAU permite a diferentes instituciones públicas como gobiernos locales la toma de decisiones informadas, en especial aquellos que forman parte de la Red de Cantones Promotores de los ODS, al estar impulsados a la investigación, implementación y seguimiento de las metas e indicadores. Esto porque muestra las zonas con posibilidad de mejora de la calidad ambiental urbana, por ejemplo, permite identificar si se requiere mayor cantidad de espacios públicos por habitante, si hay ausencia de paradas de autobús en zonas estratégicas para así mejorar el acceso en dichas zonas o también, tomar acciones respecto al agotamiento de la vegetación urbana y su influencia con las altas temperaturas.

CONCLUSIONES

El Índice de Calidad Ambiental Urbana propuesto en esta investigación llena un vacío de información presente en Costa Rica, específicamente respecto al estudio de la calidad ambiental urbana y que a su vez se encuentra altamente ligado con el desarrollo sostenible por ende con los ODS, temática en la cual, actualmente se están realizando grandes esfuerzos en búsqueda de ciudades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles mediante la toma de decisiones en el ámbito del ordenamiento territorial y planificación urbana.

La metodología empleada se diferencia de otros índices o indicadores existentes a nivel latinoamericano en la incorporación de criterios de análisis de sostenibilidad de acuerdo con las metas del ODS 11 y políticas públicas. Asimismo, la utilización de parámetros máximos y mínimos para la normalización de los datos, fundamentados en fuentes de información nacionales e internacionales, permiten la comparación de resultados entre distintos distritos o zonas de estudio.

El desarrollo de herramientas como los índices que sintetizan un concepto multidimensional, resultan sumamente efectivos para el estudio y análisis de diversas problemáticas y a la vez, para el cumplimiento o seguimiento de metas como las propuestas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente cuando se les concede una dimensión espacial. Sin embargo, dependen del acceso a información oportuna y métodos alternativos para la generación de indicadores acordes a la realidad nacional y de acuerdo con la desagregación espacial en estudio para que representen de forma óptima el objetivo de la investigación planteado.

AGRADECIMIENTOS

A las instituciones y municipalidades por brindar los datos e información indispensable para el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Nichol and M. S. Wong, "Modeling urban environmental quality in a tropical city," *Landsc Urban Plan*, vol. 73, no. 1, pp. 49–58, Aug. 2005, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2004.08.004.
- [2] Ministerio de Ambiente y Energía de Colombia, "Índice de calidad ambiental urbana," 2016. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Documento_Base_metodologica_ICAU_Version_2._agosto_2016.pdf
- [3] H. Von Breymann, "Morfología y regulación urbana en la transformación de la ciudad. El caso de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica," *Revistarquis*, vol. 6, no. 2, pp. 16–27, Sep. 2017, doi: 10.15517/RA.V6I2.30620.
- [4] Leonardo Sánchez Hernández, "Patrones de crecimiento urbano y sus impactos sobre la movilidad," San José, 2019. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/7817/Sanchez_%202019_Crecimiento_Urbano.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- [5] ONU, "La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe," 2018. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- [6] Karen Araya-Vega and Bárbara Quirós-Solano, "Propuesta de un índice para la medición de la calidad ambiental urbana (ICAU) enfocado en el Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible (ODS), aplicado en los cantones de Escazú y Cartago," Trabajo Final de Graduación, Universidad de Costa Rica, Montes de Oca, 2024.
- [7] M. Maharjan, A. Aryal, B. Man Shakya, R. Talchabhadel, B. R. Thapa, and S. Kumar, "Evaluation of Urban Heat Island (UHI) Using Satellite Images in Densely Populated Cities of South Asia," *Earth (Switzerland)*, vol. 2, no. 1, pp. 86–110, Mar. 2021, doi: 10.3390/EARTH2010006.
- [8] Y. Ma, Y. Kuang, and N. Huang, "Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 12, no. 2, pp. 110–118, Apr. 2010, doi: 10.1016/J.JAG.2009.12.002.
- [9] F. Moliní and M. Salgado, "Los impactos ambientales de la ciudad de baja densidad en relación con los de la ciudad compacta." Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.ub.edu/geocrit/b3w-958.html>

Control Anticipativo para la Mitigación de Perturbaciones en un Aerogenerador de Alta Potencia

High-Power Wind-Turbine Feedforward Control for Load-Disturbance Mitigation

Sebastián Madrigal

Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: sebastian.madrigalballester@ucr.ac.cr

0009-0001-9260-0876

Kristhel Quesada

Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: kristhel.quesada@ucr.ac.cr

0009-0008-5181-0800

José David Rojas

Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: jose.rojasf@ucr.ac.cr

0000-0003-1176-9061

Orlando Arrieta

Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: orlando.arrieta@ucr.ac.cr

0000-0002-4004-8573

Ramon Vilanova

Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes

Universitat Autònoma de Barcelona

e-mail: ramon.vilanova@uab.es

0000-0002-8035-5199

Palabras clave:

Aerogenerador, Control Anticipativo, PID, Desempeño.

Keywords:

Wind-Turbine, Feedforward Control, PID, Performance.

RESUMEN

En este trabajo se construye un esquema de control que aprovecha la característica medible del viento incidente en los aerogeneradores, con el objetivo de realizar un control que anticipe el efecto que esta

perturbación tendrá en el proceso de generación de potencia a un valor deseado para un aerogenerador de alta potencia que se simula utilizando el software FAST y Simulink. La base del sistema de control propuesto se fundamenta en conceptos como el control por modelado interno (IMC), que utiliza modelos de proceso identificados experimentalmente para encontrar los parámetros de los controladores de forma que se anulen los efectos negativos sobre el desempeño del sistema. Por último, este esquema de control se evalúa mediante índices de desempeño sobre las variables controladas del sistema y el esfuerzo realizado por la señal de control.

ABSTRACT

In this work, a control scheme that takes advantage of the measurable characteristic of the wind incident on the wind turbines is built, with the objective of realizing a control to anticipate the effect of this disturbance on the power generation process at a desired value for a high-power wind turbine that is simulated using FAST and Simulink software. The basis of the proposed control system is founded on concepts such as internal modeling control (IMC), which uses experimentally identified process models to find the controller parameters in such a way that negative effects on system performance are nullified. Finally, this control scheme is evaluated by means of performance indexes on the controlled variables of the system and the effort made by the control signal

I. INTRODUCCIÓN

En 1988, las discusiones sobre el cambio climático y la reducción en la capa de ozono comenzaron a tener un rol de importancia dentro de la agenda política y el debate público internacional. [1] En el marco tecnológico e industrial, el crecimiento de energías renovables se ha propuesto como un método para la generación de energía al tener una baja presencia de combustibles fósiles y proponer una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero. Durante las últimas décadas se ha visto gran presencia en el desarrollo de energías eólicas, siendo Dinamarca pionero en su desarrollo, seguido por proyectos en California, Alemania y España entre los años 1970 y 1980. [2] Como se analiza en [3], para el 2009, se alcanzaban las cifras de 158GW de capacidad eólica a nivel global, donde se evidencia el crecimiento de estos proyectos ya que actualmente, en el 2023, se registró aproximadamente una capacidad global de 1017.199GW, de los cuales Costa Rica fue productor de 408GW. [4] Para lograr estas capacidades, se ha utilizado diversos aerogeneradores y sistemas de control para los mismos. Algunos de los sistemas de control propuestos buscan diseñar un control del pitch mediante algoritmos de control adaptivos utilizando optimización multiobjetivo [5], en otros casos se han desarrollado metodologías para mitigar la carga lateral en las torres de aerogeneradores ubicados en el mar [6], otros trabajos se enfocan en el análisis y control para aerogeneradores de tamaño residencial en donde se mezclan algoritmos de control multivariantes con control anticipativo de las perturbaciones [7], otros trabajos se han enfocado en diseñar sistemas de control basados en el principio de anticipación de las cargas del viento incidente mediante el uso de sensores LIDAR [8]. En años más recientes se han estudiado algoritmos basados en información en tiempo real del aerogenerador utilizando inteligencia artificial para el ajuste de los esquemas de control del pitch y el par electromagnético de los aerogeneradores [9], [10]. En este trabajo se pretende realizar

un enfoque basado en el diseño de un sistema de control anticipativo para el viento incidente de un aerogenerador de alta potencia modelado por el software de FAST, evaluando el desempeño progresivo del sistema mediante un índice de desempeño ponderado.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE CONTROL

Es bastante común, al estudiar el funcionamiento de los aerogeneradores, que se definan tres regiones de operación para la generación de potencia. En este caso estas tres regiones tendrán características distintas y los objetivos de control en cada una de estas es diferente. En este caso, se trabajará con un modelo de un aerogenerador de 15MW que opera en la región III según la Figura (1a), que usualmente es conocida como la región nominal, el objetivo principal del sistema de control para esta región será mantener la potencia generada en un valor nominal, rechazando los efectos del viento incidente del aerogenerador que afectará el comportamiento ideal del mismo.

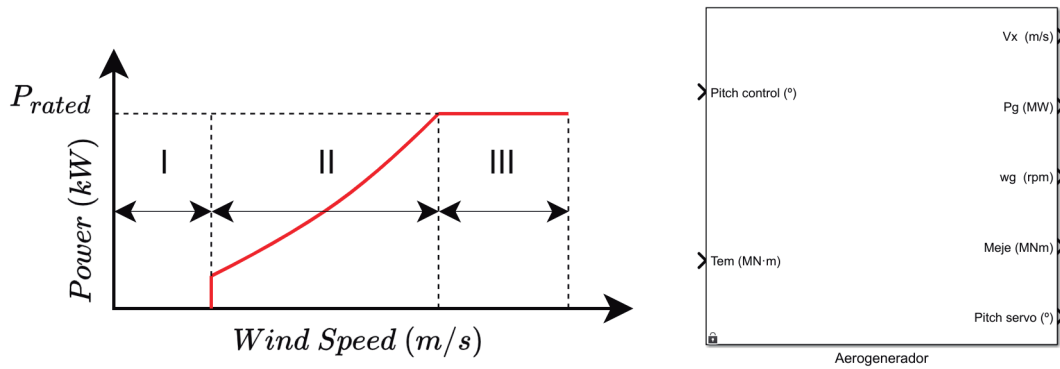


Fig. 1. (a) Regiones de Operación del Aerogenerador [11]; (b) Aerogenerador Modelado en FAST y Simulink

En esta región, el comportamiento de la potencia generada estará descrito por la ecuación (1), de donde se observa la velocidad angular del rotor ω_g , el par electromagnético T_{g_rated} y la potencia generada P_g . De esta ecuación es posible deducir que, dado que el par electromagnético se buscará que sea constante, controlar la velocidad angular del rotor equivale a controlar la potencia producida por el aerogenerador.

$$P_g = T_{g_rated} \cdot \omega_g \quad (1)$$

El modelado de la planta del aerogenerador se hace mediante el software FAST y Simulink, teniendo el modelo que se observa en la Figura (1b). Se caracteriza el modelo en un bloque con dos entradas que corresponden a las señales de control, Pitch control (°) que modifica el ángulo de las aspas mediante pitch colectivo, $T_{em} (MN \cdot m)$ que se refiere al par electromagnético, en este caso se mantendrá constante, y un total de cinco salidas que corresponden a variables de interés, $V_x (m/s)$ es la perturbación del sistema, el viento incidente, $P_g (MW)$ es la potencia generada como

señal realimentada cuyo valor nominal deberá ser 15MW, $w_g(rpm)$ se refiere a la velocidad angular realimentada, $M_{eje}(MNm)$ es el momento de torsión del eje del aerogenerador el cuál se buscará que sea el menor posible utilizando el pitch de la forma más eficiente posible y $Pitch\ servo(^{\circ})$ que es el ángulo real de las aspas del aerogenerador. Se utilizará esta planta modelada para el diseño del sistema de control anticipativo y se evaluará el desempeño del sistema implementando los diversos controladores que se irán derivando en el proceso de diseño mediante un índice de desempeño ponderado que se definirá a continuación en base a las señales realimentadas del modelo. El índice ponderado de desempeño se conforma en base en los índices raíz del valor medio de los cuadrados (RMS) indicados a continuación:

$$\begin{aligned} R_1(\omega_g) &= \sqrt{\int_0^{\infty} (\omega_{g_nom} - \omega_g(t))^2 dt} & R_1(P_g) &= \sqrt{\int_0^{\infty} (P_{g_nom} - P\omega_g(t))^2 dt} \\ R_3(\dot{M}_{eje}) &= \sqrt{\int_0^{\infty} \dot{M}_{eje}^2 dt} & R_4(\dot{\beta}) &= \frac{1}{2} \sqrt{\int_0^{\infty} \dot{\beta}^2 dt} \end{aligned} \quad (2) \quad (3)$$

En estos índices se considera, la potencia generada del aerogenerador, la velocidad angular del rotor, el momento de torsión del eje y β que es el esfuerzo de control del pitch. Finalmente, estos valores se van a ponderan en un solo índices total J_o , indicando en una sola expresión el desempeño del sistema, en donde w_i son pesos fijos que rondan entre 0 y 1 y en su totalidad suman la unidad.

$$J_o = w_1 R_1 + w_2 R_2 + w_3 R_3 + w_4 R_4 \quad (4)$$

En el índice indicado por (4), se generaliza el desempeño total del sistema de control del aerogenerador, por ende, este será el que se considerará tanto para la evaluación de resultados como para el procedimiento de optimización del esquema de control.

III. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

A. Identificación Experimental

A pesar de que el sistema del aerogenerador es simulado con una gran precisión mediante el software FAST y Simulink para su implementación, para el procedimiento de diseño del sistema de control mediante el método de control por modelado interno (IMC), será necesario identificar modelos con características dinámicas lo suficientemente aproximadas para describir de forma simple el proceso complejo del aerogenerador.

Los modelos identificados se encuentran descritos mediante las siguientes funciones de transferencia:

$$P_a(s) = \frac{-0,7489}{(7,950s + 1)(0,7470)} \quad P_d(s) = \frac{1,384}{(10,320s + 1)(0,578s + 1)} \quad (5)$$

Estos modelos se identificaron mediante el *toolbox systemIdentification* de MATLAB® y corresponden a $P_a(s)$ el modelo del proceso del aerogenerador que describe el cambio en la velocidad angular del rotor respecto a los cambios en el pitch y $P_d(s)$ corresponde al modelo de los cambios en la velocidad angular del rotor respecto al viento incidente que actúa como perturbación en el sistema.

B. Diseño del Controlador de Realimentación

Pese a que el objetivo principal en este trabajo es plantear un esquema de control anticipativo para aprovechar la característica medible que tiene el viento incidente al aerogenerador, el control anticipativo para la mitigación de las perturbaciones es incapaz de corregir los errores de la variable controlada producto a errores en el modelado o cambios en la dinámica del proceso. [12]

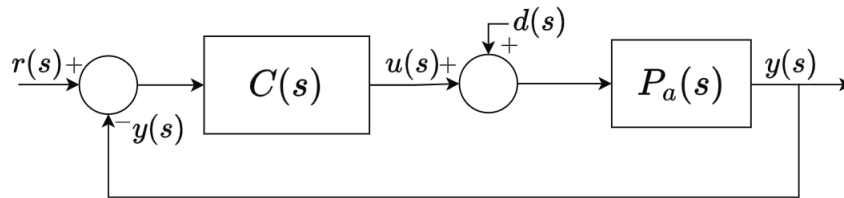


Fig. 2. Diagrama de Bloques del Sistema de Control Realimentado

Es necesario plantearlo en conjunto con un lazo de control realimentado, como el que se ilustra en la Fig. (2), donde se identifican las siguientes señales, $y(s)$ es la señal realimentada que corresponde a la velocidad angular del rotor, $u(s)$ es el ángulo de pitch colectivo que se utiliza como señal de control, $r(s)$ es la señal de referencia del sistema que en este caso será constante en la velocidad angular nominal y finalmente $d(s)$ es la perturbación de carga al sistema que para el aerogenerador será el viento incidente.

A continuación, se detalla el procedimiento de control por modelado interno (IMC) descrito por [12], en donde se busca cancelar totalmente el efecto de la dinámica del proceso, para un proceso de segundo orden como el que se describe a continuación:

$$P_m(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (6)$$

Se puede hallar un controlador PID en configuración estándar mediante la implementación de las siguientes ecuaciones:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{KT_c}, \quad T_i = T_1 + T_2, \quad T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}; \quad C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{Ns + 1} \right) \quad (7)$$

Dicho controlador PID tendrá la forma indicada en la ecuación (8), en donde se añade el filtro derivativo cuya constante será equivalente a $N = 0,1T_d$. Como se pudo observar en (7), una vez determinado el modelo $P_a(s)$ anteriormente, el único parámetro de diseño del que se dispone es la constante T_c que en este caso se ajustará a un valor óptimo en donde la ganancia proporcional no vuelva inestable la simulación del controlador implementando el lazo de realimentación propuesto.

C. Diseño del Control Anticipativo

A continuación, una vez planteado el lazo de control realimentado, es posible utilizar el modelo de la variable controlada ante las perturbaciones en el sistema $P_d(s)$ para calcular un controlador $C_d(s)$ que mitigue el efecto del viendo incidente en la respuesta del sistema, para que en conjunto con el lazo de realimentación mantenga la generación de potencia en el valor nominal de la zona de operación. El esquema del sistema de control con anticipación para la mitigación de perturbaciones se puede observar en la Fig. (3), como se puede analizar, el controlador anticipativo $C_d(s)$ contribuirá a la señal de control brindada por el controlador de realimentación $C(s)$, comportamiento que es consistente con el objetivo planteado de buscar cancelar las dinámicas de las perturbaciones que son medibles en el sistema.

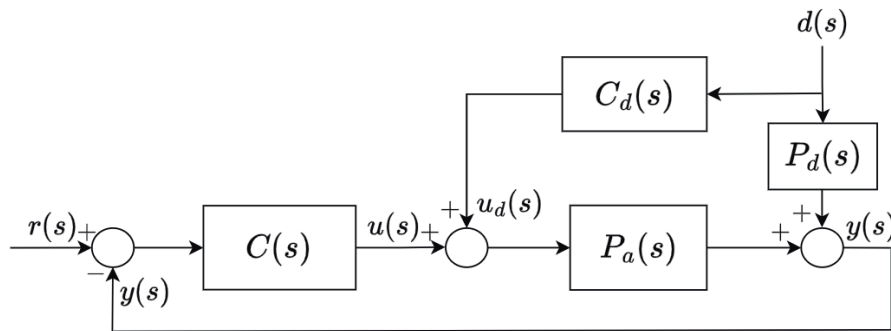


Fig. 3. Diagrama de Bloques del Sistema de Control Anticipativo

Del diagrama anterior, bajo la condición de cancelación de perturbaciones para el sistema $\frac{y(s)}{d(s)}=0$, se puede encontrar el controlador anticipativo a la perturbación $C_d(s)$, utilizando la siguiente expresión:

$$C_d(s) = \frac{-P_d(s)}{P_a(s)} \quad (8)$$

De la ecuación anterior se puede analizar que entonces, el controlador anticipativo dependerá únicamente de los modelos identificados anteriormente, por ende, que tan bueno puede llegar a ser en términos del índice del desempeño dependerá exclusivamente de que tan aproximado es el modelo identificado a la dinámica real de la perturbación.

Al utilizar un esquema de control anticipativo para cierta perturbación medible, existen varios problemas en el proceso de sintonización y ajuste del controlador, como se mencionó anteriormente, el procedimiento utilizado en este caso únicamente considera la variabilidad de los modelos identificados para el reajuste del controlador $C_d(s)$. Para intentar solventar los eventuales problemas de ruido que puede generar la utilización directa de las mediciones de la perturbación, según se trabajó en [13], se concluye que es posible añadir un factor $0 \leq \alpha \leq 1$ que ponderará la acción de control que contribuye a la señal de control del controlador de realimentación

$$C_d(s) = -\alpha \cdot \left(\frac{P_d(s)}{P_a(s)} \right) \quad (9)$$

D. Procedimientos de Optimización

Previamente se desarrolló un procedimiento de diseño para llegar a un esquema de control realimentado con un controlador anticipativo para mitigar perturbaciones que posee un factor de saturación según indica la ecuación (9). En medio de dichos pasos se encontrarán los parámetros óptimos del controlador de realimentación mediante una optimización global utilizando Algoritmos Genéticos mediante MATLAB® utilizando J_o de (4) como función objetivo a minimizar. Para cada paso de diseño posterior, se volverá a realizar la optimización del controlador de realimentación sumado al factor de saturación α cuyo valor se encontrará siguiendo esta metodología.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para realizar el análisis del desempeño que se obtiene en términos de potencia generada, se plantea una prueba en donde se estandariza el perfil de viento como se observa en la Fig. (4), en donde se toma como punto de operación $V_x = 14m/s$. De esta forma se según se va realizando el procedimiento de diseño descrito en la sección anterior, se irá evaluando el controlador resultante en términos del índice generalizado de desempeño.

CUADRO I
RESULTADOS DE LOS DIFERENTES ESQUEMAS DE CONTROL
DISEÑADOS PARA EL MODELO DEL AUTOGENERADOR DE 15MW.

Esquema Utilizado	K_p	T_i	T_d	Anticipativo	α	J_o
Control Realimentado IMC	-4.075	8.697	0.683	No	No	0.5364
Control Realimentado y Anticipativo	-3.369	14.831	1.080	Sí	1	0.4629
Control Anticipativo con Factor de Saturación	-6.991	11.561	0.341	Sí	0.4592	0.4143

Los parámetros de los esquemas de control utilizados en el procedimiento de diseño se encuentran en la CUADRO (1), en donde también se observa la evolución del índice de desempeño y como este se va reduciendo conforme se implementa el control anticipativo y el factor de saturación a este último.

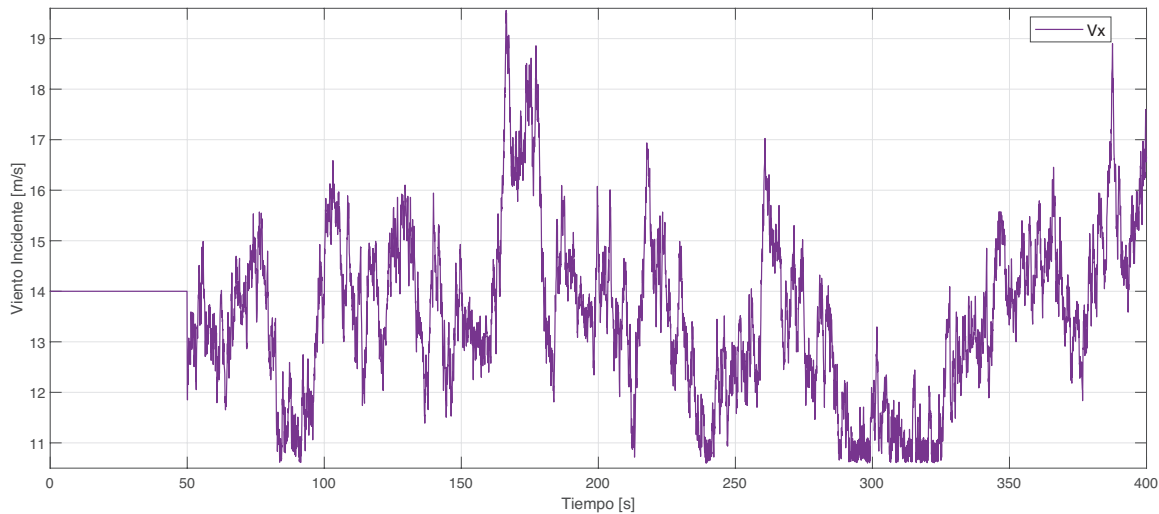


Fig. 4. Perfil del viento incidente utilizado para los resultados implementando los diferentes esquemas de control

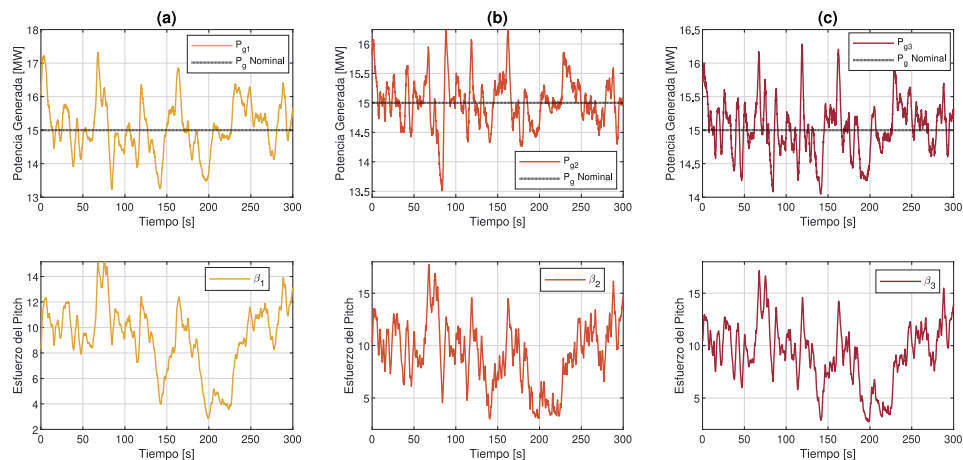


Fig. 5. (a): Potencia generada Controlador IMC; (b): Potencia generada Controlador realimentado con control anticipativo simple; (c): Potencia generada Controlador anticipativo incluyendo el factor de saturación

Los resultados pueden ser gráficamente analizados mediante la Fig. (5), donde se puede observar de forma clara la evolución del trabajo de regulación de la potencia generada conforme se implementan los diferentes esquemas de control. En este caso, tanto las gráficas como los índices se van a calcular a partir del tiempo $t=100s$ de esta forma se intenta normalizar y considerar únicamente la parte de la respuesta del sistema (en forma de potencia generada) cuando el viento incidente es distinto a su punto de operación original. Como se observa gráficamente, implementando únicamente el control realimentado se obtiene una potencia generada bastante imprecisa en donde se observa notablemente que los valores promedio de la potencia generada se alejan bastante de la potencia nominal para la región III del aerogenerador, en el segundo caso, se tiene el sistema de control realimentado implementando el control anticipativo que se diseñó previamente, en este caso tanto numéricamente ($J_o = 0,4629$), como gráficamente Fig. (5b) que la potencia generada tiende a asentarse más en su valor nominal y esto se puede atribuir al comportamiento distinto del esfuerzo del pitch ya que se puede observar mayor precisión en cada instante de tiempo y esto se debe a que en este caso ya se está considerando el efecto del viento incidente al aerogenerador. Finalmente, el último caso es cuando se añade el factor α para considerar la posible saturación del controlador $C_d(s)$ ya que se está utilizando directamente la señal del viento medido, para este último esquema de control se puede observar una mayor precisión por instante de tiempo respecto al caso anterior, esto también se refleja de forma numérica $J_o = 0,4143$, el cuál es el menor valor obtenido para el índice de desempeño entre los tres esquemas utilizados.

CONCLUSIONES

El diseño de un sistema de control anticipativo con la intención de mitigar el efecto del viento incidente a un aerogenerador ha demostrado ser funcional para aumentar la precisión de la potencia generada respecto al valor nominal en la región de plena carga del aerogenerador. El diseño del control anticipativo ha sido descrito en conjunto con soluciones a la eventual saturación del controlador producto de la señal de perturbación medida, el esquema de control resultante se ha implementado y evaluado comparándolo respecto a esquemas de control tradicionales, resultando en una mejoría para el índice de desempeño general del aerogenerador.

REFERENCIAS

- [1] P. Jackson, <From Stockholm to Kyoto: A Brief History of Climate Change, > *Green Our World!*, vol. XLIV, n.º 2, 2007.
- [2] A. Gomstyn, *The history of renewable energy*, IBM. Available in <https://www.ibm.com/blog/renewable-energy-history/>, 2024.
- [3] W. Tong, *Wind Power Generation and Wind Power Design*. WIT Press, 2010, ISBN: 978-1-84564.205-1.
- [4] IRENA, *Renewable capacity statistics 2024*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024.
- [5] M. Lara, J. Garrido, M. L. Ruz y F. Vázquez, <Adaptive Pitch Controller of a Large-Scale Wind Turbine Using Multi-Objective Optimization, > *Applied Sciences*, vol. 11, n.o 6, 2021, ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11062844.

- [6] M. Lara, F. Vázquez, I. Sandua-Fernández y J. Garrido, «Adaptive Active Generator Torque Controller Design Using Multi-Objective Optimization for Tower Lateral Load Reduction in Monopile Offshore Wind Turbines», > *IEEE Access*, vol. 11, págs. 115 894-115 910, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3325840.
- [7] M. E. González, J. Garrido, F. Morilla y F. Vázquez, «Multivariable Centralized Control with Decoupling and Feedforward Compensation for Residential Wind Turbine», > *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, n.º 1, págs. 557-562, 2011, 18th IFAC World Congress, ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03113>.
- [8] D. Schlipf y P. W. Cheng, «Flatness-based Feedforward Control of Wind Turbines Using Lidar», > *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, n.º 3, págs. 5820-5825, 2014, 19th IFAC World Congress, ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00443>.
- [9] J. Xie, H. Dong y X. Zhao, «Data-driven torque and pitch control of wind turbines via reinforcement learning», > *Renewable Energy*, vol. 215, págs. 118 893, 2023, ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.06.014>.
- [10] A. Nabeel, A. Lasheen, A. L. Elshafei y E. Aboul Zahab, «Fuzzy-based collective pitch control for wind turbine via deep reinforcement learning», *ISA Transactions*, vol. 148, págs. 307-325, 2024, ISSN: 0019- 0578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.03.023>.
- [11] S. Madrigal, D. Campos, O. Arrieta y R. Vilanova, «Control of a high-power wind-turbine generator, V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería», *Ingeniería*, vol. 34, n.º NE4, págs. 138-146, mar. de 2024. DOI: 10.15517/ri.v34iNE5.59019.
- [12] V. M. Alfaro, ed., *Sistemas de control proporcional, integral y derivativo: Algoritmos, análisis y ajuste*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2018.
- [13] Á. Hoyo, T. Hagglund, J. L. Guzmán y J. C. Moreno. «A practical solution to the saturation problem in feedforward control for measurable disturbances», *Control Engineering Practice*, vol. 139, pág. 105-636, 2023, ISSN: 0967-0661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105636>

Herramienta de código abierto para el diseño de Sistemas Fotovoltaicos con Baterías

Open Source Tool for Photovoltaic Battery Systems Design

Victor Vega-Garita

Profesor, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: victor.vegagarita@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0003-2133-5830>

Daniella Carranza-Zamora

Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: daniella.carranza@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0009-0001-0542-2427>

Palabras clave:

Baterías, código abierto, diseño, sistemas fotovoltaicos.

RESUMEN

La creciente necesidad de incorporar generación eléctrica en la matriz energética hace necesario contar con herramientas que permitan realizar un diseño eficiente de sistemas fotovoltaicos (FV) con baterías. Presentamos una herramienta de código abierto para el dimensionamiento y simulación de microrredes basadas en sistemas FV. Por medio de esta herramienta se superan las limitaciones relacionadas al *software* propietario, costoso y poco flexible, haciendo que en muchos casos no se pueda ajustar a la realidad regulatoria de los países (tarifas, costos y reglamentos técnicos). Esta herramienta, utiliza un proceso iterativo para encontrar la combinación óptima de módulos fotovoltaicos y almacenamiento de energía para sistemas conectados a la red eléctrica al considerar criterios técnicos y económicos. La herramienta incorpora información de potencial de energía solar para toda Costa Rica así como la posibilidad de acceder a 6188 curvas de carga tanto para el sector residencial como para el sector comercial del país, en caso de que el usuario cuente con información limitada sobre su consumo eléctrico. Adicionalmente, los resultados de la herramienta se compararon con el programa SAM® y se obtuvieron resultados similares para dos casos de estudio, lo cual le da validez al algoritmo propuesto.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto costarricense, la necesidad de aumentar la adopción de energía solar es especialmente apremiante. La gran dependencia de la energía hidroeléctrica en la época seca ha hecho que la posibilidad de “apagones” eléctricos generalizados se vuelva a plantear, cuando el potencial de energía solar es el más alto. De forma que ambas fuentes de energía, la solar y la hidroeléctrica, se podrían complementar. Aunado a lo anterior, la dependencia de la generación térmica se puede reducir, lo cual provoca que los costos de generación aumenten significativamente durante la época seca. Además, como se menciona en [1], ya para el año 2021 la capacidad instalada en el segmento de

generación distribuida (privada) en el país era de $72,4 \text{ MW}_p$, según datos de la Dirección de Energía del Ministerio de Ambiente y Energía. Para seguir desarrollando esta tecnología, es fundamental contar con herramientas de diseño que permitan la construcción de sistemas fotovoltaicos (FV) de forma accesible cercanos al contexto de Costa Rica, en cuanto a tarifas, normativas, costos y perfiles de carga (consumo eléctrico).

Para realizar un buen dimensionamiento de un sistema FV con baterías, se requieren herramientas sofisticadas que realicen simulaciones anuales con un paso de tiempo de al menos una hora. Existen diversos softwares de pago en el mercado diseñados para este propósito, como PVsyst®, PV*SOL® y SAM®. PVsyst® se especializa en el modelado de sistemas fotovoltaicos, proporcionando un análisis detallados, con la posibilidad de un gratuito limitado a 30 días (prueba) con funcionalidades limitadas y un costo de 675 USD por mes, mientras PV*SOL® cuesta 1295 USD y se deben cancelar de forma adicional las actualizaciones [2]. HOMER®, conocido por su robusto algoritmo de optimización que evalúa múltiples configuraciones de sistemas energéticos, también ofrece un período de prueba gratuito, pero de solo 21 días. Por otro lado, SAM®, aunque es una herramienta gratuita que permite el modelado de diversas tecnologías, presenta una complejidad alta y poca flexibilidad de adaptación a contextos energéticos diferentes al estadounidense –donde fue desarrollada–. Además, la mayoría de estos programas no proporcionan acceso abierto a los algoritmos y criterios utilizados en sus cálculos. Esta falta de transparencia puede ser una desventaja para los usuarios que desean personalizar las herramientas según las necesidades específicas de sus proyectos o adaptarlas a regulaciones locales. En contraste, la necesidad de herramientas accesibles y adaptables se hace evidente.

Este artículo científico se diferencia de trabajos preliminares y herramientas existentes al proponer una solución preliminar de código abierto para el dimensionamiento y modelado de microrredes eléctricas con sistemas FV integrados con baterías con una interfaz amigable. La herramienta está diseñada para ser accesible y adaptable a las condiciones específicas de Costa Rica, al considerar la información del potencial solar para todo el país, así como perfiles de carga basado en 6188 curvas anuales de consumo medidas.

II. MARCO TEÓRICO

La **generación distribuida** (GD) se refiere a la producción de energía eléctrica a partir de fuentes ubicadas cerca del punto de consumo, lo que contrasta con el modelo tradicional de generación centralizada. Esta proximidad entre la generación y el consumo reduce las pérdidas en la transmisión y mejora la eficiencia del sistema energético. La GD puede incluir una variedad de fuentes de energía, tanto renovables como no renovables, aunque globalmente se ha observado una tendencia creciente hacia el uso de recursos renovables como la energía solar, eólica y de biomasa. La GD puede clasificarse en micro generación ($1 - 5 \text{ kW}_p$), pequeña generación ($5 - 5000 \text{ kW}_p$), mediana generación ($5 - 50 \text{ MW}_p$) [3]. En el caso de Costa Rica, no es habitual encontrar sistemas de GD con potencias instaladas mayores de 2 MW_p .

Las **microrredes** integran GD y almacenamiento de energía, lo cual permite un suministro con cierto nivel de autonomía si se está conectado a la red. Al estar la generación de energía cerca del punto de consumo, se reducen las pérdidas en la transmisión y mejora la eficiencia del sistema

energético. Las microrredes pueden operar de manera aislada o conectadas a la red principal, pues proporcionan flexibilidad y resiliencia en el suministro eléctrico [4].

Los **sistemas FV** están compuestos por módulos fotovoltaicos, inversores y, en múltiples ocasiones por sistemas de almacenamiento de energía por medio de baterías. Los módulos fotovoltaicos convierten la energía solar en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, utilizando células solares que generan potencia en corriente continua (CC). Esta potencia en corriente continua se convierte a corriente alterna (AC) por los inversores. Las baterías permiten almacenar el exceso de energía generada durante los períodos de alta irradiancia solar para su uso posterior; este proceso se realiza en CC.

Un **sistemas de manejo de la energía** (EMS por sus siglas en inglés) considera variables como la demanda de carga, la generación fotovoltaica y los recursos de almacenamiento de energía para desarrollar algoritmos que optimicen el flujo de potencia y maximicen el autoconsumo local hacia cada uno de los componentes del sistema [5].

Por otro lado, el **dimensionamiento** adecuado de un sistema fotovoltaico es crucial, ya que un tamaño incorrecto puede tener efectos adversos en su funcionamiento y, aún más importante, implicaciones económicas significativas en los costos de la microrred. En esta sección, se discutirán sobre tres métricas esenciales para dimensionar los componentes de un sistema fotovoltaico con baterías de manera adecuada.

El autoconsumo de electricidad generada por energía fotovoltaica es la proporción de energía producida localmente, que se consume por las cargas eléctrica de la residencia o comercio, cada paso de tiempo –generalmente cada hora–. Este se calcula según la ecuación (1):

$$\phi_{\text{autoconsumo}} = \frac{\int_{\text{anual}} P_{\text{fv,bconsumida}}(t) dt}{\int_{\text{anual}} P_{\text{fv generada}}(t) dt}, \quad (1)$$

donde $P_{\text{fv,bconsumida}}$ es la potencia consumida por las cargas proveniente de la suma del sistema FV y baterías, mientras que $P_{\text{fv generada}}$ es potencia generada por el sistema FV.

La **autarquía** es un concepto que se refiere a la independencia energética de una microrred. Así, una microrred con una autarquía alta, aunque conectada a la red eléctrica centralizada, no importa cantidades significativas de energía de fuentes externas, sino que intenta satisfacer sus necesidades energéticas a partir de su propia producción eléctrica. Matemáticamente, el concepto de la autarquía viene dado por la ecuación (2):

$$\phi_{\text{autarquia}} = \frac{\int_{\text{anual}} P_{\text{fv,bconsumida}}(t) dt}{\int_{\text{anual}} L(t) dt}, \quad (2)$$

siendo L la potencia total consumida por las carga sin importar el origen.

Hasta ahora se han definido dos métricas técnicas. Por lo que se establecerá una relación de

costo–beneficio financiera. De este modo, se introduce el concepto del **Valor Presente Neto** (VPN), el cual refleja el hecho de que el dinero disponible en el momento cuando empieza el análisis tiene más valor que la misma cantidad en el futuro, debido a la inflación, ya que se reduce el poder adquisitivo a largo plazo [6]. El (VPN) traduce los flujos de caja de una inversión al valor monetario actual, lo que permite tomar decisiones financieras como determinar el tiempo de retorno de inversión. Para calcularlo, se necesitan los flujos de caja: un valor inicial negativo que representa los costos del proyecto y valores positivos anuales de ahorro. La ecuación (3) del VPN, se observa a continuación:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

donde R_t representa los flujos de caja, i es la tasa de descuento con que se devalúan los valores futuros en el presente y t es la cantidad de años escogidos para realizar la proyección.

III.FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta cuenta con seis pestañas que se describen en esta sección y se explican en detalle para comprender los procesos que se ejecutan.

A. Localización, datos meteorológicos y fecha

En esta sección (*Location, meteo & Dates*), se sigue una metodología muy similar a la propuesta en [7], donde, a partir de la información de la latitud y longitud del lugar donde se desea instalar el sistema FV con baterías, se obtiene la posición del Sol durante un año típico. Luego, con la información de la orientación de los módulos FV e información meteorológica (temperatura ambiente, velocidad del viento, e irradiación global, directa y difusa) se obtiene la irradiación sobre el plano. Como se puede ver en la Fig. 1a, la información meteorológica se obtiene por defecto con base en la ubicación del sistema FV (cada hora para cualquier parte del país). Existe la posibilidad de que el usuario introduzca su propia información, desde otro *software* o por medio de mediciones históricas del sitio de instalación. Típicamente, los análisis se hacen de forma anual, pero pueden elegir períodos más cortos.

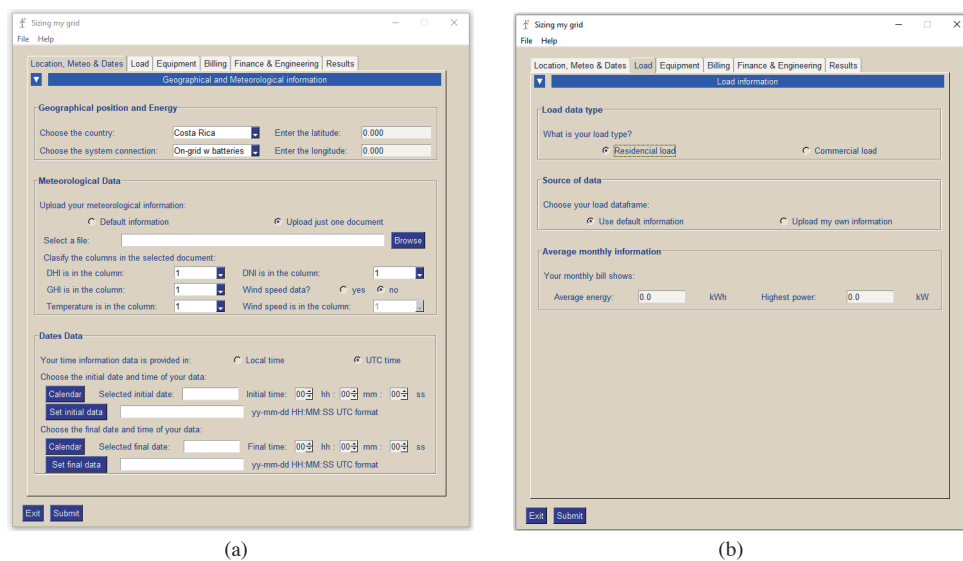
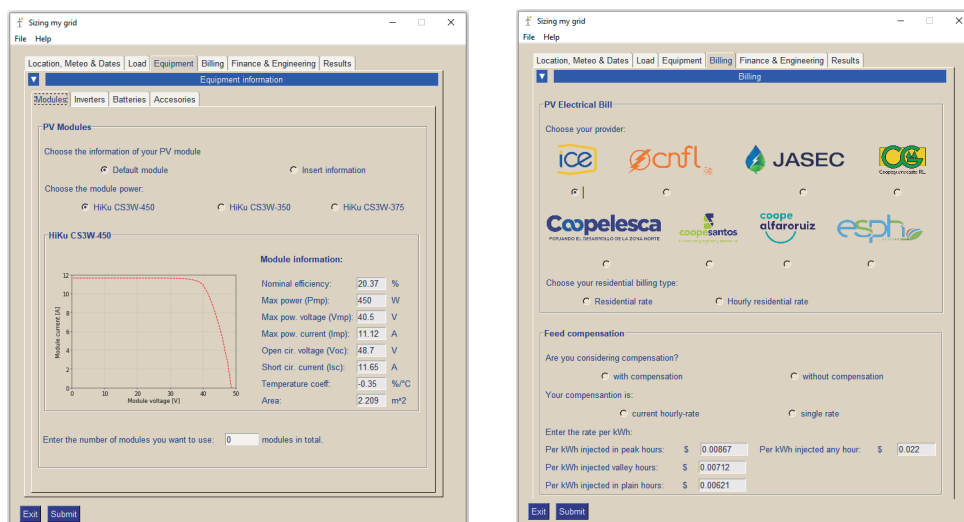


Fig. 1. (a) Localización y datos meteorológicos, (b) Consumo eléctrico

B. Consumo energético

Aquí, se hace una evaluación metódica del consumo para entender las necesidades energéticas del usuario. Se inicia definiendo el tipo de sector al cual pertenece la carga (ya sea residencial o comercial). Si el usuario no cuenta con información del perfil de carga en el tiempo, se procede a buscar de una base de datos de más de 6188 mediciones la que más se asemeje a su consumo, tanto en términos de energía como de potencia (si se cuenta con la información). Si no se encuentran datos que cumplan con los valores de energía y potencia, se usan curvas de consumo promedio como referencia para construir un perfil de carga que corresponda con la energía consumida indicada por el usuario, como en [1], donde se observa una curva de consumo eléctrico correspondiente a 12,5 kWh diarios construida al usar la curva de demanda típica agregada como referencia definida por el ICE en [8].



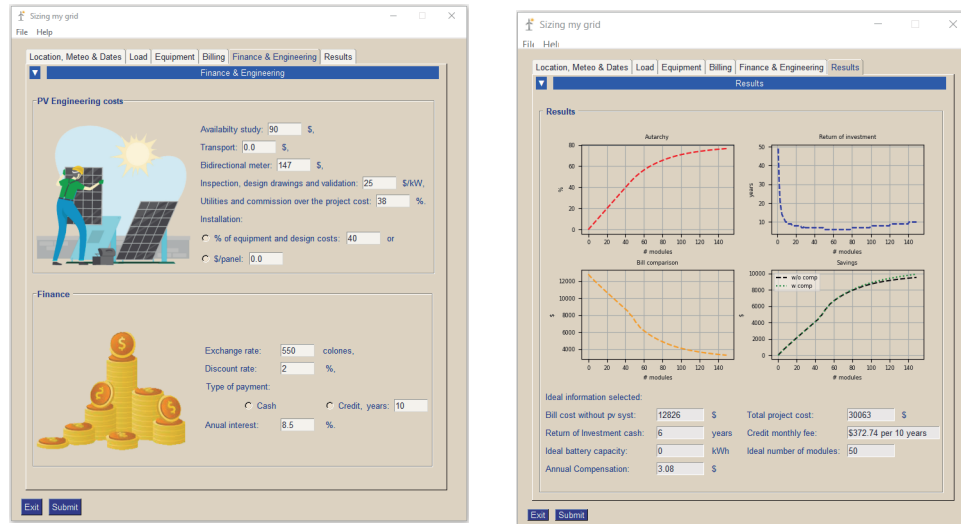


Fig. 2. (a) Equipos, (b) Facturación, (c) Finanzas e ingeniería, (d) Resultados

C. Equipos

En esta sección, se definen los parámetros técnicos de los módulos fotovoltaicos (eficiencia, coeficientes térmicos, potencia, etc), inversores (potencia nominal, eficiencia, cantidad de fases) y baterías (capacidad en kWh y tensión) a utilizar. Se cuenta con una base de datos con equipos predefinidos (ver Fig. 1a). Si el usuario, tiene la información, puede agregar sus propios componentes con los costos respectivos. Adicionalmente, se pueden incluir componentes como el cableado, sistema de sujeción y accesorios con el fin de incluir sus costos en el análisis financiero a llevarse a cabo en la sección D.

En esta etapa, ya se cuenta con todos los datos necesarios para implementar el EMS que decide la magnitud y dirección de los flujos de energía, como se definió en [1]. Adicionalmente, es importante mencionar que el EMS usado en esta herramienta implementa todos los posibles modos de operación establecidos en [9] y sigue un tipo de arquitectura *DC coupled* como se reporta en [10].

D. Facturación y finanzas e ingeniería

Esta pestaña incluye los costos asociados con la energía que se compra de las distribuidoras eléctricas, ya sea tarifa plana u horaria, y si se trata del sector residencial o comercial, según lo establecido por la ARESEP (como se observa en la Fig. 2b). Además, se definen los valores de la energía que se inyecta a la red (que es posible con la nueva normativa). Para cada empresa, se usan los valores más actuales tanto de inyección de energía como de retiro de energía, valores que luego se pueden modificar si fuese necesario. Igualmente, se añaden los costos por alumbrado público, tributos de bomberos e IVA.

La pestaña de finanzas e ingeniería recibe costos adicionales como: transporte, estudio de disponibilidad, medidor bidireccional, inspección, diseño, validación del proyecto, utilidades, comisiones y costos de instalación (ver Fig. 2d). Adicionalmente, la sección incluye funcionalidades para actualizar variables financieras cruciales como el tipo de cambio y la tasa de descuento o el

interés anual, dependiendo del método de pago elegido, sea al contado o a crédito, lo cual facilita la evaluación financiera.

Finalmente, la pestaña de resultados presenta un resumen de los principales hallazgos en términos del costo de la energía que se consume, el tiempo de retorno de la inversión y el número óptimo de módulos FV para lograr el mejor dimensionamiento técnico-económico (ver Fig. 2d).

IV. RESULTADOS

En esta sección, se presentan detalladamente los resultados obtenidos para un comercio con alto consumo energético. Se ejecutó una simulación con una latitud de 10.20° y una longitud de -83.67° cuya información se usó para obtener el potencial de generación solar en ese punto del país durante un año que corresponde a Guácimo, Limón. Por otro lado, la carga eléctrica se cataloga como comercial (ICE, con costo por kWh de 107.7 CRC y de 64.45 por kW demandado). El consumo de energía se aproxima a los 5831 kWh mensuales con un pico máximo de potencia de 16,2 kW. Dicho perfil de carga se adaptó a las condiciones de potencia y energía antes mencionadas y resultó en la Fig. 3a, el cual representa un consumo de energía anual de 12 826 USD.

Las características de los módulos FV se indican en la Fig. 1a. Además, se utilizó un costo de 172 USD por módulo, 1815 USD por cada inversor necesario, 4.5 USD por módulo de cableado, 9,24 USD de accesorios por módulo, y los demás datos corresponden a lo mostrado en la Fig. 2c, donde se supone que sobre el precio de los equipos se cobra un 38 % de ganancias y un 40 % por instalación.

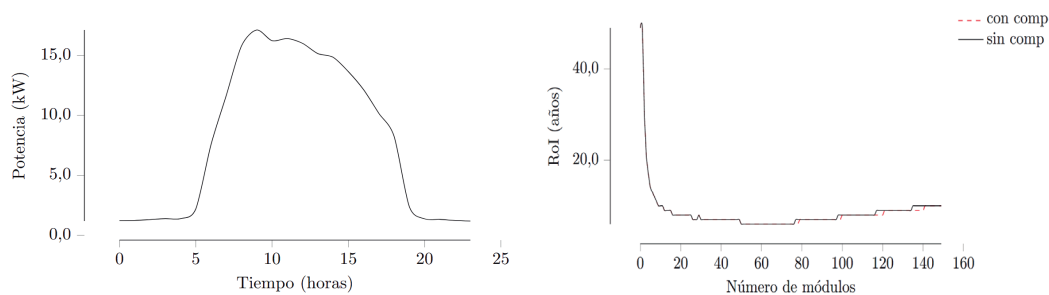


Fig. 3. (a) Perfil de carga para un consumo de 5831 kWh mensuales y pico máximo de potencia de 16,2 kW y (b) tiempo de retorno de inversión en función de la cantidad de módulos FV

La herramienta indica (ver Fig. 2d) que el costo total de la inversión inicial es de 30 063 USD. Para estos valores, se señala que la cantidad óptima de módulos FV es de 50 con un período de recuperación de inversión de 6 años. Para este número de módulos, se obtienen una reducción anual de la factura eléctrica de 5437 USD. Como se observa en la Fig. 3b, luego de 50 módulos el retorno de inversión empieza a aumentar. De igual forma, al analizar el comportamiento de la autarquía (gráfico arriba a la izquierda en Fig. 2d), se observa que a partir de 50 módulos el aumento en la autarquía disminuye y empieza el proceso de saturación de la curva. Es decir, a pesar de que la cantidad de módulos se aumenta, el cambio en la autarquía es mínimo. Un comportamiento similar

se puede apreciar en la disminución de la factura energética anual y en el aumento de los ahorros en la Fig. 2d (ambos abajo).

Por otro lado, resulta interesante indicar que para el tipo de perfil de carga no resulta financieramente conveniente incluir un sistema de almacenamiento de energía. Esto porque, aunque es posible que la autarquía alcance un valor cercano a un 100 % y los ahorros sean cercanos a la factura que se debería haber pagado en caso de no tener un sistema FV instalado, el costo de inversión del sistema integrado FV con baterías es tan alto que se dispara el período de retorno de inversión. Por ejemplo, resultados de las iteraciones que guarda la herramienta, pero que no se muestran directamente en la pestaña de resultados al usuario, indican que un ahorro del 90 % de la factura eléctrica se podría alcanzar con 110 módulos FV y una capacidad de almacenamiento de energía de 20 kWh, sin embargo, esto resultaría en una microrred con un período de recuperación mayor a los 6 años.

Ahora, se comparan los resultados ingresando las mismas variables en el *software* SAM[®], e.g. 50 módulos FV del mismo tipo, inversores de la misma potencia y costos. Es relevante aclarar, que aunque ambos programas están hechos para campos de estudio parecidos, no todas las etapas internas de modelado son idénticas. Además, SAM[®] no provee información sobre el dimensionamiento nada más simula un sistema FV dado, es decir, no lleva a cabo el proceso iterativo para buscar óptimo en términos de período de retorno de inversión y autarquía.

El cuadro 1 presenta el resumen de los valores obtenidos por nuestra herramienta y SAM[®]. Para la energía inyectada desde la red hacia la carga, SAM[®] dice que se inyectaron unos 2500 kWh más que nuestra herramienta, lo que indica una desviación de 6.53 %. En el caso de la energía total producida por el sistema FV, nuestra herramienta produjo aproximadamente 3400 kWh más que SAM[®], representando una diferencia de 10.77 %. Por su parte, las autarquías de ambos programas se mantienen muy parecidas, para una variación del 9.26 %, similar

CUADRO I
COMPARACIÓN ANUAL ENTRE SAM[®] Y HERRAMIENTA DE CÓDIGO
ABIERTO DESARROLLADA PARA LAS MISMAS ENTRADAS

Parámetro	Herramienta	SAM [®]
Costos _{proyecto}	\$ 30 063,00	\$ 30 078,92
E_{red}	35 805,22 kWh	38 308,91 kWh
E_{FV}	34 804,21 kWh	31 417,60 kWh
$E_{Autarquía}$	49.32 %	45,14 %
$E_{FV_{acarga}}$	34 424,47 kWh	31 284,82 kWh

a los porcentajes anteriores. Las diferencias pueden deberse a varios aspectos, pues si bien se trató de hacer una comparación justa al usar los mismos datos de entrada, SAM[®] posee modelos que corren de forma automática y que no se pueden modificar, como su modelo térmico que en este caso difiere al de nuestra herramienta. Solo esto, provoca la diferencia en energía FV producida que a su vez influye en los demás resultados. Sin embargo, las diferencias de un 10 % o menos,

lo que verifica que nuestra herramienta da resultados similares a los de un *software* ampliamente usado en el mundo.

La herramienta propuesta en esta etapa de la investigación aún no incluye el efecto de la degradación del sistema de almacenamiento como en [11]. Por lo que, se planea en próximos pasos incluir su efecto al utilizar una metodología como la planteada en [12].

CONCLUSIONES

Este artículo ha confirmado la viabilidad de utilizar una herramienta de código abierto para la simulación y dimensionamiento de microrredes eléctricas con integración de sistemas fotovoltaicos y baterías. Los resultados obtenidos son comparables a los proporcionados por el *software* SAM®, verificando el uso de nuestra herramienta. El análisis realizado demuestra que la propuesta desarrollada automatiza y logra reproducir el comportamiento de una microrred mientras ofrece la posibilidad de usar información realista sobre el consumo eléctrico en el sector residencial y comercial con más de 6 000 perfiles de carga anuales. Además, la herramienta ofrece la oportunidad de acceder datos de potencial solar para todo el país previamente validados, así como implementar metodologías tarifarias de Costa Rica. Por último, su capacidad para competir con opciones comerciales establecidas permite a los usuarios acceder a una herramienta potente sin costos asociados pertinente al contexto nacional.

REFERENCIAS

- [1] V. V. Garita, M. I. Blanco-Alfaro y A. P. Mora, «Análisis técnico-económico de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento de energía para clientes con tarifa residencial en Costa Rica,» *Ingeniería*, vol. 33, n.o 2, págs. 17-41, 2023.
- [2] J. Alpízar-Castillo, V. Vega-Garita, N. Narayan y L. Ramirez-Elizondo, «Open-Access Model of a PV-BESS System: Quantifying Power and Energy Exchange for Peak-Shaving and Self Consumption Applications,» *Energies*, vol. 16, n.o 14, 2023, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16145480. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/14/5480>.
- [3] T. Ackermann, G. Andersson y L. Söder, «Distributed generation: a definition,» *Electric power systems research*, vol. 57, n.o 3, págs. 195-204, 2001.
- [4] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi et al., «Trends in microgrid control,» *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 5, n.o 4, págs. 1905-1919, 2014.
- [5] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson y J. Palm, «Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,» *Applied energy*, vol. 142, págs. 80-94, 2015.
- [6] A. Gallo, «A refresher on net present value,» *Harvard Business Review*, vol. 19, págs. 1-6, 2014.
- [7] V. Vega-Garita, V. Alpizar-Gutierrez y J. Alpízar-Castillo, «A practical method for considering shading on photovoltaics systems energy yield,» *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, pág. 100 412, 2023, ISSN: 2590-1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100412>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174523000685>.
- [8] I. C. de Electricidad, «Plan de expansión de la generación eléctrica 2018 - 2034,» 2019. dirección: www.grupoice.com.
- [9] V. Vega-Garita, M. F. Sofyan, N. Narayan, L. Ramirez-Elizondo y P. Bauer, «Energy Management

- System for the Photovoltaic Battery Integrated Module,» *Energies*, vol. 11, n.o 12, 2018, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en1123371. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3371>.
- [10] I. Sulaeman, V. Vega-Garita, G. R. C. Mouli, N. Narayan, L. Ramirez-Elizondo y P. Bauer, «Comparison of PV-battery architectures for residential applications,» en *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2016, págs. 1-7. DOI: 10.1109/ENERGYCON.2016.7514014.
- [11] V. Vega-Garita, A. Hanif, N. Narayan, L. Ramirez-Elizondo y P. Bauer, «Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module,» *Journal of Power Sources*, vol. 438, pág. 227 011, 2019, ISSN: 0378-7753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227011>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775319310043>.
- [12] N. Narayan, T. Papakosta, V. Vega-Garita et al., «Estimating battery lifetimes in Solar Home System design using a practical modelling methodology,» *Applied Energy*, vol. 228, págs. 1629-1639, 2018, ISSN: 0306- 2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.152>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310225>.

Optimización y gestión de datos para el transporte público

Recolección en tiempo real de datos de telemetría y rastreo en el transporte público

Real-time Collection of Telemetry and Tracking Data in Public Transportation

Fabián Abarca Calderón
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: fabian.abarca@ucr.ac.cr

Adrián Cordero Méndez
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: adrian.corderomendez@ucr.ac.cr

Edson Joao Murillo Mamani,
Escuela de Ingeniería, UCR
e-mail: edson.murillo@ucr.ac.cr

Palabras clave:

API, ARC-IT, arquitecturas tecnológicas, GTFS, transporte público inteligente.

RESUMEN

Este artículo propone el diseño de un servidor web y la especificación de una interfaz de programación de aplicaciones (API) llamada *Databús* v1.0 para la recolección de datos de telemetría y rastreo vehicular en un sistema inteligente de transporte público, desarrollados a partir de la investigación de estándares, tecnologías y modelos de datos y de comunicación aptos para el transporte público y basados en principios de diseño orientados a la interoperabilidad y la neutralidad tecnológica.

Un subconjunto de la propuesta es implementado en el plan piloto de un sistema de información para el servicio de buses del campus de la Universidad de Costa Rica, con el objetivo de proveer datos GTFS *Realtime*, una especificación de datos en tiempo real para uso de aplicaciones de planificación de viajes intermodales y otros medios de difusión, como páginas web y pantallas.

Como complemento al sistema, diseñamos también la aplicación móvil *Databús* para uso de los conductores de los autobuses, como alternativa básica y de bajo costo de un equipo de telemetría y rastreo.

ABSTRACT

This article proposes the design of a web server and the specification of an Application Programming Interface (API) called *Databús* v1.0 for the collection of telemetry and vehicle tracking data in an intelligent public transportation system. These are developed based on the research of

standards, technologies, and data and communication models suitable for public transportation, and based on design principles oriented towards interoperability and technological neutrality.

A subset of the proposal is implemented in the pilot plan of an information system for the bus service on the campus of the University of Costa Rica, with the aim of providing GTFS Realtime, a real-time data specification for use in intermodal trip planning applications and other distribution media, such as web pages and screens.

As a complement to the system, we also designed the *Databús* mobile application for use by bus drivers, as a basic and low-cost alternative to telemetry and tracking equipment.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas inteligentes de transporte público utilizan tecnologías de información y comunicación para facilitar la recolección y uso de datos masivos provenientes de equipos y sensores en vehículos e infraestructura [1]. Estos datos son utilizados para mejorar la operación del sistema, su gestión administrativa, su planificación, su regulación y, sobre todo, para mejorar la experiencia de las personas usuarias del servicio [2].

Como sistema, el transporte público inteligente es una industria de alta tecnología [3] que opera sobre la base de sensores [4], redes de telecomunicaciones [5] y técnicas modernas de procesamiento y análisis de datos [6], entre otros componentes tecnológicos.

Este artículo presenta el diseño de un servicio de recolección de datos de telemetría y rastreo vehicular en tiempo real de autobuses, que es una de las diversas plataformas tecnológicas que habilitan los servicios de transporte público inteligente. Para esto implementamos el servidor web llamado realtime, diseñamos la especificación de la interfaz de programación de aplicaciones (API) llamada *Databús* v1.0 y especificamos la aplicación móvil llamada *Databús* para celulares Android y iOS.

El diseño del servidor y su API abarca una gama amplia de categorías de datos en tiempo real para vehículos de transporte público, elegidos a partir de la arquitectura de referencia para transporte colaborativo e inteligente del Departamento de Transporte de Estados Unidos (ARC-IT, *Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation*) [7] que ofrece una generalidad suficiente para cualquier implementación típica.

Por su parte, la aplicación móvil *Databús* es una implementación limitada pero práctica y de bajo costo para suplir datos a un sistema de información para personas usuarias con la especificación GTFS Realtime. *Databús* puede ser utilizado en celulares Android y iOS de bajas prestaciones, y utilizado con mínimas modificaciones en los autobuses y con poca intervención de los conductores del vehículo.

La filosofía de diseño favorece el uso de tecnologías y estándares abiertos, una arquitectura orientada hacia la interoperabilidad, la posibilidad de la participación de múltiples proveedores tecnológicos y la posibilidad de una implementación gradual de creciente complejidad. Todas estas características, a nuestro criterio, son deseables en el contexto de Costa Rica, donde no ha sido posible hasta ahora hacer una inversión del tamaño requerido para crear un sistema “monolítico” de transporte público

inteligente con beneficios tangibles, de amplio alcance y durables para las personas usuarias, a pesar de varios esfuerzos previos [8][9].

II. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto consiste en una investigación bibliográfica sobre estándares y arquitecturas de sistemas inteligentes de transporte público. También abarca la identificación de necesidades de los servicios conectados a este sistema y relevantes para el transporte público, la investigación y selección de modelos de datos de transporte público en tiempo real y sus detalles, y la investigación y selección de un modelo de comunicación entre el equipo del vehículo y el servidor en tiempo real. Además, se incluye el diseño del API (modelo de comunicación elegido) siguiendo una arquitectura REST conforme a la especificación OpenAPI v3.0, el diseño del servidor para implementar el diseño creado, el diseño funcional de la aplicación móvil para la implementación de bajo costo del equipo del vehículo, y finalmente la discusión sobre el diseño presentado y el trabajo futuro.

III. ARQUITECTURA DEL SERVIDOR EN TIEMPO REAL

El diagrama tecnológico del sistema del plan piloto completo está en la figura 1, con la implementación de este artículo en el cuadro resaltado.

Para diseñar la arquitectura de este subsistema de recolección de datos en tiempo real, es necesario seleccionar un *modelo de datos de transporte público en tiempo real*, es decir, aquellos datos que son relevantes para el servicio y que son procesados en tiempo real, y un *modelo de comunicación* entre el vehículo y el servidor, que sea apropiado para la naturaleza de los datos, los requerimientos del servicio y las posibilidades tecnológicas, como los equipos y redes de telecomunicaciones disponibles.

A. Modelos de información de datos de transporte público

La selección de los datos, según aparece en la especificación del API en la sección IV.A, viene de dos fuentes principales, que son referencias globales en el tema de sistemas de información para personas usuarias y transporte público inteligente: GTFS y ARC-IT.

A.1. GTFS

La especificación del suministro de datos abiertos de transporte público (GTFS, *General Transit Feed Specification*) es un estándar *de facto* para la distribución de información del servicio entre aplicaciones de planificación de viajes intermodales, como Google Maps o Moovit, y otros servicios como pantallas informativas o inclusive para labores de regulación del servicio e investigación académica. GTFS tiene dos grandes categorías de datos:

GTFS Schedule Presenta datos “estáticos”, como los datos de la agencia operadora, las rutas, las paradas, las trayectorias geoespaciales, las tarifas y los horarios, entre otras informaciones. Esto

constituye la información básica que una persona usuaria debería conocer para utilizar eficientemente el servicio.

GTFS Realtime Actualiza la información de la posición de los vehículos, la estimación de tiempos de llegada a las paradas y las alertas del servicio. A pesar de su nombre, debe ser considerado de tiempo casi real pues, estrictamente hablando, es actualizado a una frecuencia regular con un periodo del orden de decenas segundos en donde envía la información recopilada de todos los vehículos durante ese intervalo.

En particular, GTFS *Realtime* entrega los siguientes conjuntos de datos, llamados *entidades*:

VehiclePositions Entidad que especifica información como la posición geoespacial del vehículo, su nivel de ocupación de pasajeros y el nivel de congestión vial, entre otros. Estos datos son recopilados y suministrados por el *equipo electrónico* en los vehículos.

TripUpdates Entidad que actualiza los tiempos estimados de llegada a las paradas para cada viaje y avisa cancelaciones o cambios de ruta. Estos datos son calculados y suministrados por el *servidor* en tiempo real.

Alerts Entidad que informa sobre afectaciones al servicio, como cambios de paradas, interrupciones de la vía pública, eventos inesperados y otros. Estos datos son editados y suministrados por la *agencia operadora* del servicio, con intervención humana.

GTFS ofrece el detalle de todos los datos por enviar, incluyendo el nombre, el formato exacto de dato que admite, la lista de valores permitidos, etc.

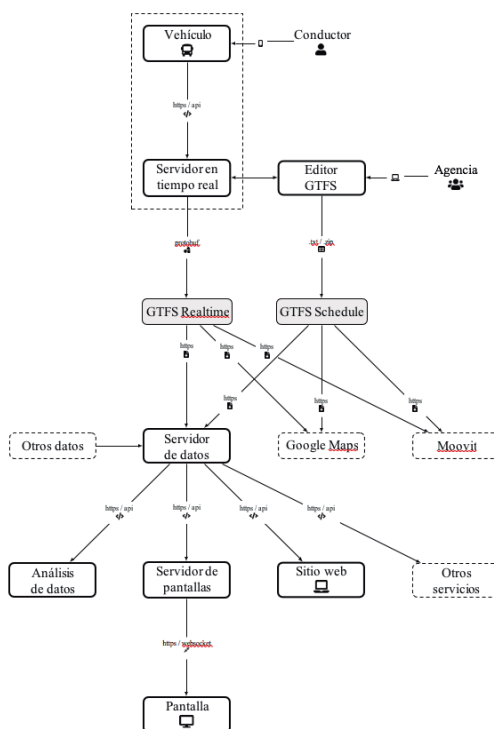


Fig. 1. Diagrama tecnológico de la implementación del sistema de información para BUCR

A.2. ARC-IT

La arquitectura de referencia de transporte colaborativo e inteligente del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (ARC-IT, *Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation*) es un modelo amplísimo desde la perspectiva de la ingeniería de sistemas que describe las distintas perspectivas, motivaciones, componentes, actores, tecnologías, interfaces y muchos otros aspectos de un sistema inteligente de transporte. Según su descripción, es el producto de varias décadas de experiencia de administradores, usuarios, desarrolladores tecnológicos, comunidades y otras partes involucradas en el transporte.

En su núcleo están los paquetes de servicio (*service packages*), que son aplicaciones para proveer soluciones a problemas específicos. Por ejemplo, en el área de transporte público existen los paquetes de servicio **PT01** Rastreo de Vehículos de Transporte Público y **PT08** Sistemas de Información de Pasajeros, entre otros.

Para efectos de nuestro diseño en este trabajo, ARC-IT solamente llega hasta el nivel de detalle de una, así llamada, *tripleta* de comunicación, en la que especifica el origen del mensaje, el destinatario y el tipo del mensaje, pero sin dar ninguna especificación sobre el contenido. Por ejemplo, una tripleta es: equipo electrónico del vehículo (fuente) → datos de emisiones (mensaje) → centro de administración del transporte público (destino).

B. Modelos de comunicación vehículo / servidor

La forma de comunicación entre el vehículo y el servidor es una elección relevante. En general, será aceptado que la comunicación será sobre la red celular, que permite conexiones TCP/IP, sin embargo, es necesario definir el modelo de comunicación propiamente.

Solicitud/respuesta (*request/response*) En este paradigma un cliente hace una solicitud a un servidor, el cual envía de vuelta una *respuesta* [10]. HTTP es el ejemplo más conocido. Los web API operan sobre HTTP y son la opción más popular en la actualidad para conectar servicios. Es importante anotar que la comunicación siempre es iniciada por el cliente, lo que pone algunas limitaciones para las comunicaciones en tiempo real desde el servidor hacia el cliente, que estará condicionada a una estrategia de *polling* (sondeo) regular para recibir nuevas notificaciones.

Orientada a eventos (*event-driven*) En la arquitectura orientada a eventos (EDA, *Event-driven Architecture*) la generación de un evento puede desencadenar la invocación de uno o más servicios desacoplados [11]. Es utilizada en varios dominios como redes de sensores, control de sistemas en tiempo real, monitoreo de salud y otros [12].

Publicación/suscripción (*pub/sub*) En este paradigma un *publicador* genera mensajes sobre eventos para ser propagados a *suscriptores* que reciben la información por medio de canales de tópicos específicos distribuidos por un *intermediador de mensajes*. Es típicamente utilizado en sistemas de notificación de eventos [13] como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) o AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*).

El modelo de comunicación elegido para el sistema es un web API siguiendo la especificación OpenAPI v3.0.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El servidor realtime está implementado con un sistema operativo **Linux Ubuntu** 22.04 LTS, la base de datos geoespacial **PostgreSQL** 14 con la extensión **PostGIS**, el lenguaje de programación **Python** 3.11, la plataforma de *backend* **Django** v5.0, el módulo Django **REST Framework** v3.15.1 para el API, el administrador y planificador de tareas **Celery** v5.3.6 y el intermediador de mensajes **Redis** v5.0.1.

Este es un proyecto de código abierto. El repositorio está disponible en GitHub en la dirección <https://github.com/fabianabarca/realtime> y su documentación está en <https://fabianabarca.github.io/realtime>. El proyecto está alojado en el servidor de prueba <https://realtime.bus.ucr.ac.cr>.

A. Especificación del API Databús v1.0

El API fue diseñado siguiendo las especificaciones de OpenAPI v3.0., el estándar de *facto* en la industria para diseñar API tipo REST. Los puntos finales o *endpoints* para intercambio de datos están descritos desde la tabla ?? hasta la ??, en la sección ?. La documentación completa del web API está en la dirección <https://realtime.bucr.digital/api/docs/>.

Patrones de actualización Los mensajes enviados al servidor por medio del API tienen una actualización que varía según el tipo de dato. Cuando son causados por un evento, el mensaje es enviado al momento de ocurrencia. Por ejemplo, el abordaje o descenso de un pasajero. Otros tipos de datos serán agrupados según su frecuencia de actualización regular, que puede variar entre unas cuantos segundos para la posición, unos cuantos minutos para las condiciones del vehículo como el nivel de combustible, o unas cuantas horas para la cuantificación de las emisiones de gases. En las tablas de descripción de los *endpoints* hay una indicación del tipo de actualización y la frecuencia de muestreo o bien el evento activador.

B. Funcionalidad de la aplicación móvil Databús

Para el plan piloto es necesaria una alternativa de bajo costo de funcionalidad limitada como equipo de rastreo vehicular para poder habilitar, al menos, la creación de GTFS *Realtime*. Una app puede ser usada con:

Interfaz de registro de equipo Conecta la *app* con el servidor, vinculado a un vehículo.

Interfaz de registro de operador Reporta el inicio de labores de un conductor en el vehículo.

Interfaz de inicio de viaje Reporta la ruta, dirección, fecha y hora de salida de un viaje. Al iniciar el viaje la app hará un reporte cada 10 segundos de su posición, velocidad y orientación.

Interfaz de ocupación Habilita el reporte de las categorías de ocupación en GTFS de parte del conductor, que no es una medición directa sino una estimación que puede hacer en cada parada.

Las categorías de ocupación son: vacío, muchos asientos disponibles, pocos asientos disponibles, solo espacio de pie, espacio de pie estrujado, completo, no acepta pasajeros, no hay datos disponibles, no abordable.

CONCLUSIONES

1. En este trabajo realizamos una investigación bibliográfica para determinar cuáles estándares, modelos de información, arquitecturas tecnológicas y modelos de comunicación son relevantes para la recopilación de datos de telemetría y rastreo en tiempo real en el transporte público.
2. Hicimos una selección de los datos, la arquitectura y el protocolo de comunicación para diseñar un sistema de telemetría y rastreo con base en criterios de interoperabilidad y neutralidad tecnológica.
3. El API diseñado tiene 21 puntos finales (*endpoints*) para intercambio de datos, junto con un esquema detallado de los parámetros de consulta y los datos tanto en la solicitud (*request*) como la respuesta (*response*).
4. La especificación abierta del API Databús v1.0 es de uso general y puede ser utilizado en Costa Rica con cualquier equipo de telemetría y rastreo instalado en los autobuses. La especificación completa está en la dirección <https://datahub.bucr.digital/api/docs/>.
5. La aplicación móvil *Databús* descrita ofrece una alternativa limitada pero práctica y de bajo costo para una implementación inicial del equipo electrónico del autobús. Esto ofrece la posibilidad de una implementación gradual sin altos costos iniciales.
6. La investigación reveló que, a pesar de la relevancia de este tipo de sistemas tecnológicos para todas las partes involucradas en el sistema de transporte público, el Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020 - 2035) [14] –que actualmente constituye una referencia importante para el desarrollo del sector en el país– no menciona explícitamente en sus 41 indicadores nada relacionado con las tecnologías de información y comunicación en el transporte público, revelando un vacío en la política pública sobre este tema.

REFERENCIAS

- [1] M. Alam, J. Ferreira y J. Fonseca, eds., *Intelligent Transportation Systems, Dependable Vehicular Communications for Improved Road Safety*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-28183-4.
- [2] W. Barfield y T. A. Dingus, *Human factors in intelligent transportation systems*. Psychology Press, 1998. DOI: 10.4324/9781315806624.
- [3] MDIP. «Modernizing transit technology with open standards.» (15 de ago. de 2023), dirección: <https://www.interoperablemobility.org/>.

- [4] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally y J. Contreras-Castillo, «Sensor technologies for intelligent transportation systems,» *Sensors*, vol. 18, n.o 4, pág. 1212, 2018. DOI: 10.3390/s18041212.
- [5] M. Tubaishat, P. Zhuang, Q. Qi e Y. Shang, «Wireless sensor networks in intelligent transportation systems,» *Wireless communications and mobile computing*, vol. 9, n.o 3, págs. 287-302, 2009. DOI: 10.1002/wcm.616.
- [6] Y. Wang, D. Zhang, Y. Liu, B. Dai y L. H. Lee, «Enhancing transportation systems via deep learning: A survey,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 99, págs. 144-163, feb. de 2019. DOI: 10.1016/j.trc.2018.12.004.
- [7] U.S. Department of Transportation, «Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation (ARC-IT) v9.0, The National ITS Reference Architecture,» U.S. Department of Transportation, inf. téc., 2020. dirección: <http://www.arc-it.net/>.
- [8] M. Cordero Parra, «Sistemas inteligentes permitirán vigilancia y control del transporte público,» *Semanario Universidad*, 26 de abr. de 2018. dirección: <https://semanariouniversidad.com/ultima-hora/sistemas-inteligentes-permitiran-vigilancia-y-control-del-transporte-publico/>.
- [9] J. A. Céspedes, «Nueva app de Incofer informa sobre horas de llegada y posibles retrasos de tren,» *La Nación*, 19 de jul. de 2021. dirección: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/nueva-app-de-incofer-informa-sobre-horas-de/77VIHEFUWBD5RCOTXFM4KL4XO4/story/>.
- [10] S. Kumar, «A Review on Client-Server based applications and research opportunity,» *International Journal of Recent Scientific Research*, vol. 10, n.o 7, págs. 33 857-3386, 2019.
- [11] L. Lan, B. Wang, L. Zhang, R. Shi y F. Li, «An Event-driven Service-oriented Architecture for Internet of Things Service Execution,» *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 11, mar. de 2015. DOI: 10.3991/ijoe.v11i2.3842.
- [12] A. Rahmatulloh, F. Nugraha, R. Gunawan e I. Darmawan, «Event-Driven Architecture to Improve Performance and Scalability in Microservices-Based Systems,» en *2022 International Conference Advance-ment in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS)*, 2022, págs. 01-06. DOI: 10.1109/ICADEIS56544.2022.10037390.
- [13] C. Rodríguez-Domínguez, K. Benghazi, M. Noguera, J. L. Garrido, M. L. Rodríguez y T. Ruiz-López, «A Communication Model to Integrate the Request-Response and the Publish-Subscribe Paradigms into Ubiquitous Systems,» *Sensors*, vol. 12, n.o 6, págs. 7648-7668, 2012, ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s120607648.
- [14] Secretaría de Planificación Sectorial, «Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020 - 2035),» Ministerio de Obras Públicas y Transportes, inf. téc., 2020.

Estudio de la información del servicio de transporte público en Costa Rica

Study of Public Transportation Service Information in Costa Rica

Fabián Abarca Calderón
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: fabian.abarca@ucr.ac.cr

Marco Alejandro Araya Salazar
Escuela de Administración de Negocios, UCR
e-mail: marco.arayasalazar@ucr.ac.cr
0009-0007-2650-2534

Palabras clave:

diseño de servicios, GTFS, transporte público inteligente.

RESUMEN

La información para las personas usuarias del transporte público es un factor esencial para aumentar su utilización y para mejorar su satisfacción con el servicio. En este artículo reportamos los resultados de un estudio sobre la disponibilidad de información en línea del transporte público en Costa Rica, que es determinada y cuantificada con un estudio de 372 rutas en modalidad autobús. Los resultados confirman una carencia de información para las personas usuarias del servicio.

ABSTRACT

Information for public transportation users is an essential factor for increasing its utilization and improving user satisfaction with the service. In this article, we report the results of a study on the availability of online public transportation information in Costa Rica, which was determined and quantified through a study of 372 bus routes. The results confirm a lack of information for public transportation users.

I. INTRODUCCIÓN

Según nuestra definición, los sistemas de información en el transporte público son un conjunto de canales de comunicación y tecnologías que permiten a las personas usuarias conocer los detalles del servicio necesarios para su utilización efectiva.

Dentro de los datos abiertos y estandarizados que consideramos necesarios para la utilización del servicio [1], los hemos categorizado de la siguiente forma:

Sobre la agencia operadora Información de contacto y medios de atención al cliente

Sobre las rutas Códigos, nombres, descripción y colores que ayudan a la identificación

Sobre las paradas Ubicación, infraestructura, facilidades, seguridad y accesibilidad

Sobre los viajes y horarios Tiempos de salida de cada viaje y de preferencia para cada parada

Sobre los días de operación Especificación de rangos de operación semanal y estacional y cambios en feriados

Sobre las tarifas Detalles del precio, métodos de compra y de pago

Sobre datos geoespaciales y mapas Mapas de los recorridos de las rutas y ubicación de las paradas

Estos, pues, se convierten en los criterios o rubros de búsqueda para evaluar la disponibilidad de información en línea de las rutas de autobús en Costa Rica.

En Costa Rica no existe un medio oficial de información del transporte público en modalidad autobús [2]. Tanto el Consejo de Transporte Público (CTP) como la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP) tienen disponibles listas de las rutas y de las empresas concesionarias del servicio, y otras informaciones, pero no información de horarios y otros con una interfaz apropiada para difusión. Por tanto, y debido a la fragmentación operativa del servicio con más de 300 empresas autobuseras [3], la información actualmente depende de las posibilidades de cada empresa [4].

II. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El estudio fue realizado en la semana del 6 al 11 de mayo de 2024 mediante una búsqueda textual en el buscador Google, por parte de estudiantes del trabajo comunal universitario TC-691 “Tropicalización de la tecnología”. Los insumos para el estudio fueron una lista con 372 rutas de autobús en Costa Rica con su código, nombre y operador, una lista de palabras clave de búsqueda, con base en nuestra definición de información necesaria para utilización efectiva del servicio.

El procedimiento consistió en buscar por nombre de la ruta y por nombre de operador, buscar con palabras claves “ruta”, “bus”, “autobús”, “Costa Rica” u otros que sean convenientes para encontrar resultados. Si había información en otras fuentes (por ejemplo, páginas de terceros o en Moovit o similar) era indicado en los comentarios, junto con cualquier otra observación sobre la información encontrada.

Clasificación de semáforo Para una muestra de 372 rutas, y con una evaluación numérica de 0, 1 y 2, es posible obtener a nivel de sistema (todas las rutas) y por cada rubro una evaluación mínima de 0 (cuando ninguna ruta cumple) y máxima de 744 (cuando todas cumplen de manera aceptable). Para clasificar de forma genérica cada rubro proponemos una escala de la siguiente forma, donde X es la suma de todas las puntuaciones de todas las rutas:

-  **Verde** $558 \leq X < 744$: la disponibilidad de información es buena.
-  **Amarillo** $372 \leq X < 558$: la disponibilidad de información es regular.
-  **Naranja** $186 \leq X < 372$: la disponibilidad de información es deficiente.

● **Rojo** $0 \leq X < 186$: la disponibilidad de información es mala.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Fue utilizada una escala 0, 1 y 2, que representan respectivamente “ausente”, “incompleto” y “aceptable” para evaluar cada aspecto de información necesario según los criterios expuestos. Los resultados para los once rubros analizados están a continuación.

Página web Una página web es un recurso versátil y de gran alcance para difundir información del servicio. En la mayoría de los casos es la fuente primaria de información para las personas usuarias. El desarrollo web, sin embargo, es costoso y difícil de asumir para una empresa concesionaria sin recursos suficientes y sin una guía precisa de implementación de parte de las autoridades gubernamentales.

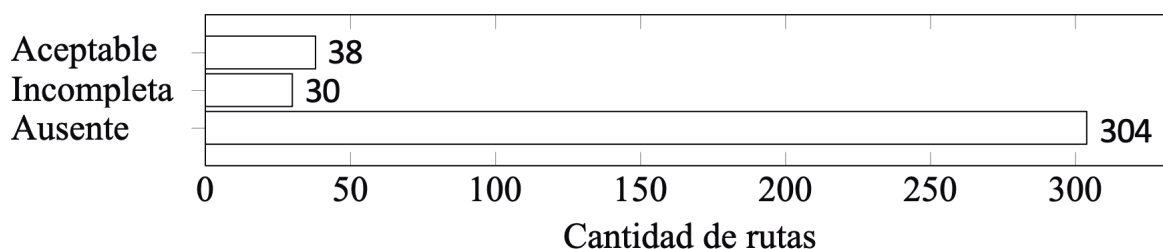


Fig. 1. Disponibilidad de una **página web** sobre la ruta — Clasificación **mala** ● (106 de 744 puntos)

Facebook Menos efectivo que una página web para desplegar información del servicio, pero más fácil de configurar y mantener, una página de Facebook de la ruta permite también acceder a un público amplio. Hay una leve mejoría entre las rutas que tienen información aquí, pero sigue siendo deficiente.

En nuestro criterio, Facebook debe acompañar el esfuerzo de comunicación, pero no debe ser la fuente primaria de datos, puesto que la naturaleza de su uso es distinta.

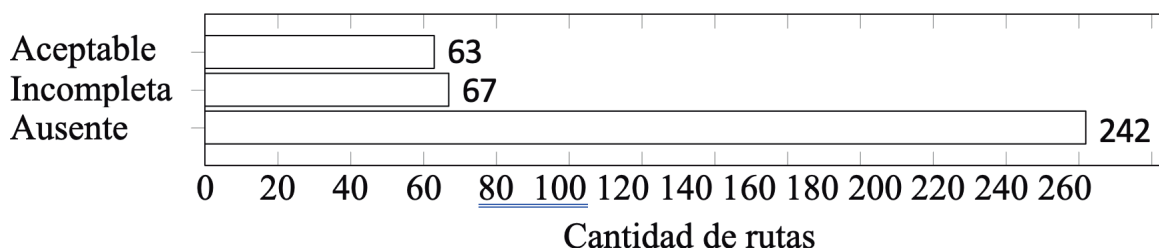


Fig. 2. Disponibilidad de una **página de Facebook** sobre la ruta — Clasificación **deficiente** ● (193 de 744 puntos)

Instagram Similar a Facebook, Instagram es una red social con una penetración significativa entre el público costarricense, que puede ser un canal aprovechado para mantener una relación con

las personas usuarias y dar alertas sobre el servicio fáciles de publicar. Sin embargo, la utilización es muy baja entre las rutas.

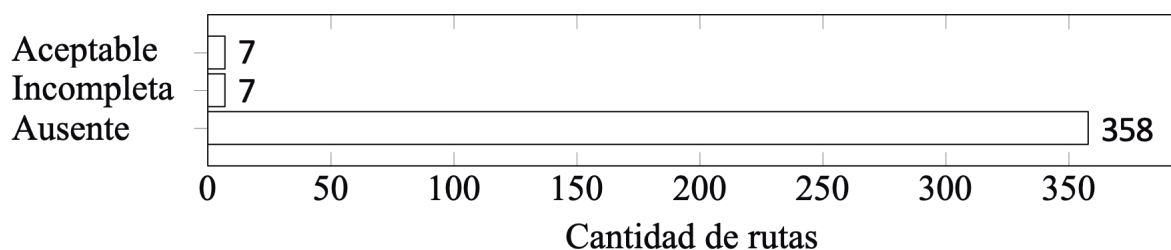


Fig. 3. Disponibilidad de una **página de Instagram** sobre la ruta — Clasificación **mala** ● (21 de 744 puntos)

Sobre la agencia operadora Dada la diversidad de empresas concesionarias en el país, es importante tener información básica de contacto. Esta información sigue ausente en más de la mitad de las rutas. Estos datos son esenciales para atención al cliente, canalización de quejas y otros.

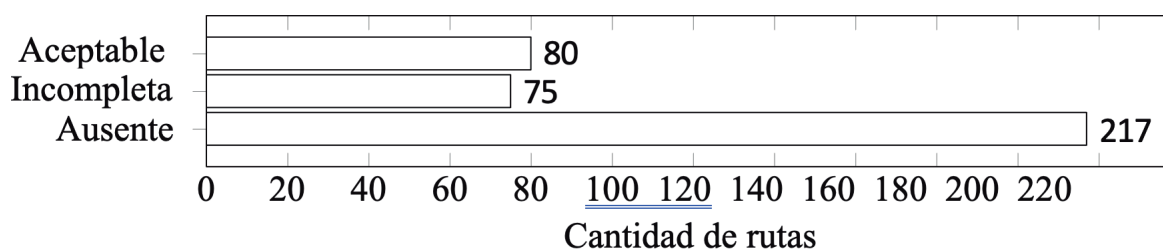


Fig. 4. Disponibilidad de información de **la agencia operadora** de la ruta — Clasificación **deficiente** ● (235 de 744 puntos)

Sobre la ruta Para comenzar a usar el servicio, es primordial conocer ciertos detalles sobre la ruta misma, incluyendo el nombre, un código identificador e inclusive colores propios. En muchos sistemas alrededor del mundo, esta información es indispensable para el uso del servicio, como: “ruta naranja” o “ruta 39”. En Costa Rica, a pesar de la existencia de un código de ruta, no es común su utilización, sino que las personas usuarias las llaman por sus lugares de origen y/o destino, como “ruta de San Gabriel”. Además, nótese que en el país el sistema de códigos actual no es utilizable para este fin dado que no es único: está repetido para algunas rutas que funcionalmente son diferentes. Ejemplo: la ruta 157 es Acosta - San José pero también la de San Gabriel.

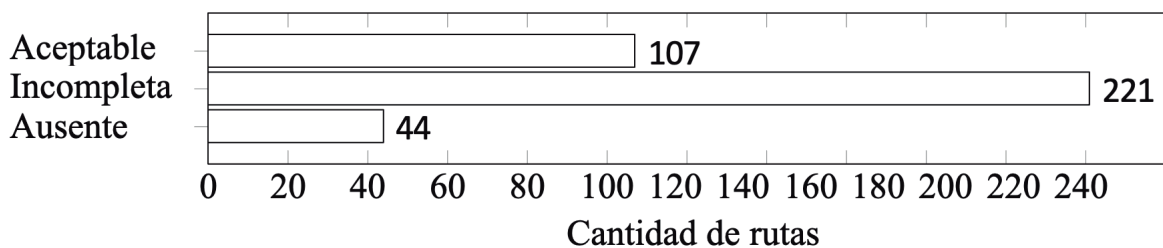


Fig. 5. Disponibilidad de **información detallada sobre la ruta** — Clasificación **regular** ● (435 de 744 puntos)

Sobre las paradas Una información básica para el uso del servicio para quien no lo conoce son los datos de las paradas, para poder planificar el viaje. Actualmente, aparte de su existencia en documentos oficiales, es difícil encontrar la lista completa de paradas de una ruta, que para rutas largas pueden ser varias decenas en un viaje.

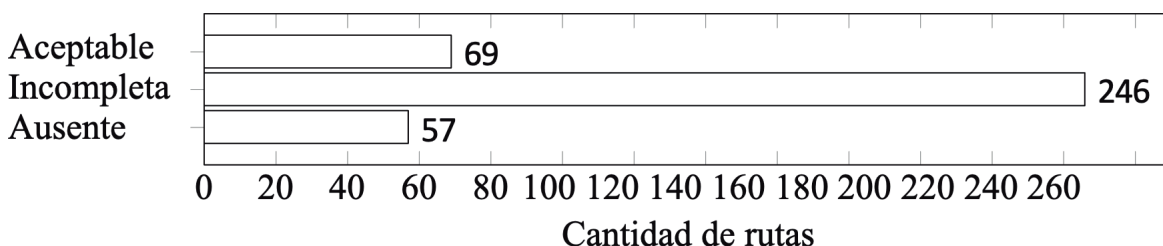


Fig. 6. Disponibilidad de información sobre **las paradas** de la ruta — Clasificación regular ● (384 de 744 puntos)

Sobre los viajes y horarios La información esencial de operación del servicio son los horarios de los viajes, especialmente en rutas que no funcionan por frecuencia. Este rubro tiene mejor presencia, sin embargo, menos de una tercera parte tiene una calificación aceptable, la cual debería ser “universal”, dada su importancia. Además, muchos de estos horarios son imágenes o fotos, que no es el formato óptimo ni posibilita la planificación de viajes intermodales en aplicaciones especializadas.

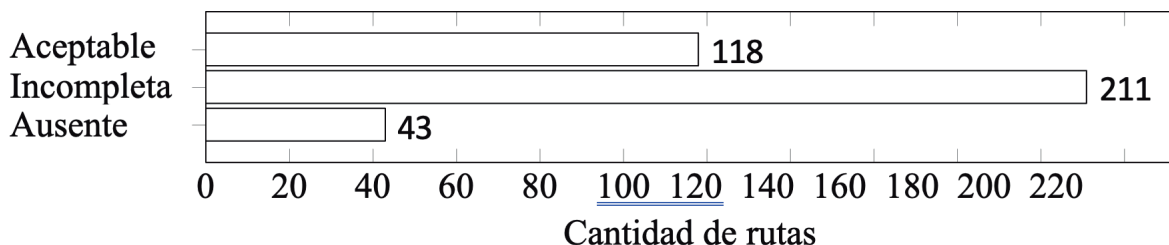


Fig. 7. Disponibilidad de información sobre **los horarios** de la ruta — Clasificación regular ● (447 de 744 puntos)

Sobre los días de operación En Costa Rica, típicamente los horarios están divididos para días entre semana, sábados, domingos. Sin embargo, no es común encontrar el detalle de los cambios al servicio por feriados.

Según la experiencia con Transportes San Gabriel descrita en la sección IV, los fines de semana (sábados, específicamente) y las fechas especiales (como Semana Santa y el día de la romería) son las que reciben mayor visitación en el sitio pues, según nuestra hipótesis, las personas requieren información especialmente en estos casos no ordinarios, y por eso la importancia de su presencia.

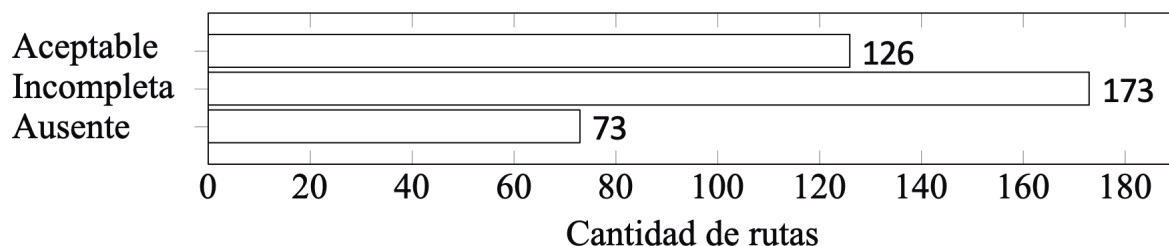


Fig. 8. Disponibilidad de información sobre los **días de operación** de la ruta — Clasificación regular ● (425 de 744 puntos)

Sobre las tarifas En este aspecto hay una peor disponibilidad que en el caso de horarios y días de operación. La Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) tiene una página con esta información pero no está diseñada para fácil consumo de las personas usuarias ni ofrece el contexto apropiado, como horarios y otros datos.

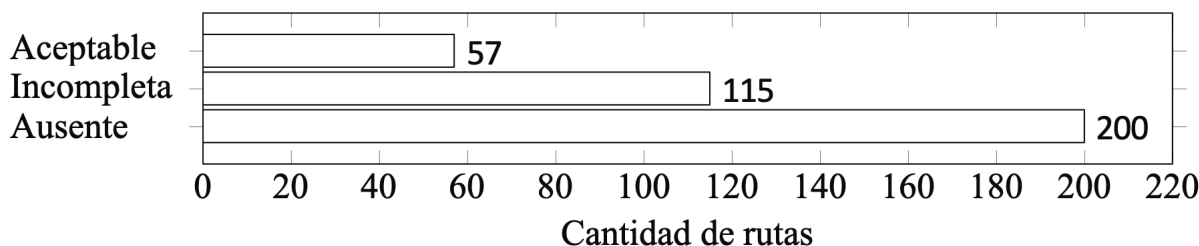


Fig. 9. Disponibilidad de información sobre **las tarifas** de la ruta — Clasificación deficiente ● (229 de 744 puntos)

Sobre los mapas Para desplazamientos geográficos, los mapas son una herramienta valiosa pero subutilizada en el sistema de buses de Costa Rica. Es posible encontrar imágenes de mapas, pero no siempre existe la posibilidad de ubicar ahí las paradas o de usarlo de forma interactiva.

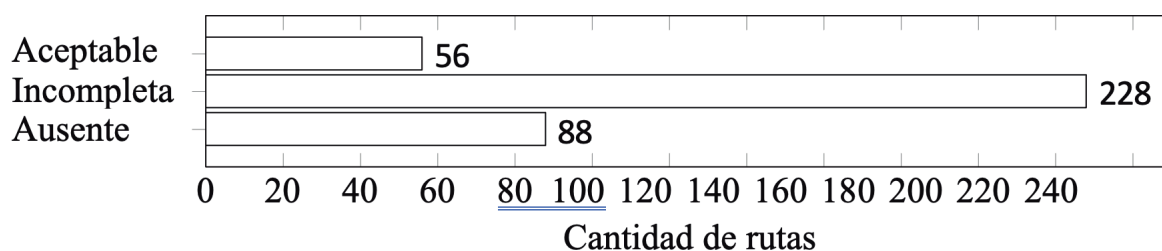


Fig. 10. Disponibilidad de información sobre mapas de la ruta — Clasificación deficiente ● (340 de 744 puntos)

Sobre otros sitios informativos En ausencia de canales oficiales de información sobre el transporte público, algunos sitios web y aplicaciones en el país ponen a disposición información de las rutas. Entre los servicios mencionados están la aplicación móvil y sitio web Moovit y el sitio Yo Viajo Costa Rica (<https://yoviajocr.com/>).

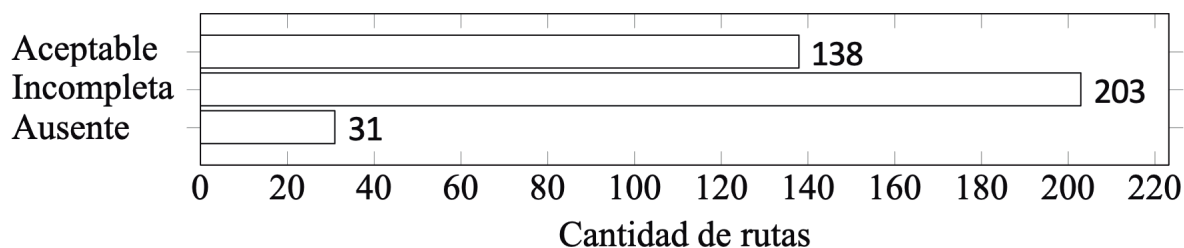


Fig. 11: Disponibilidad de información en otros sitios o aplicaciones sobre la ruta — Clasificación regular ● (479 de 744 puntos)

Síntesis de calificaciones por rubro Con base en la suma de las calificaciones para cada rubro de las 372 rutas, es posible asignar la evaluación de cada aspecto. La figura 12 muestra la comparación para los once elementos.

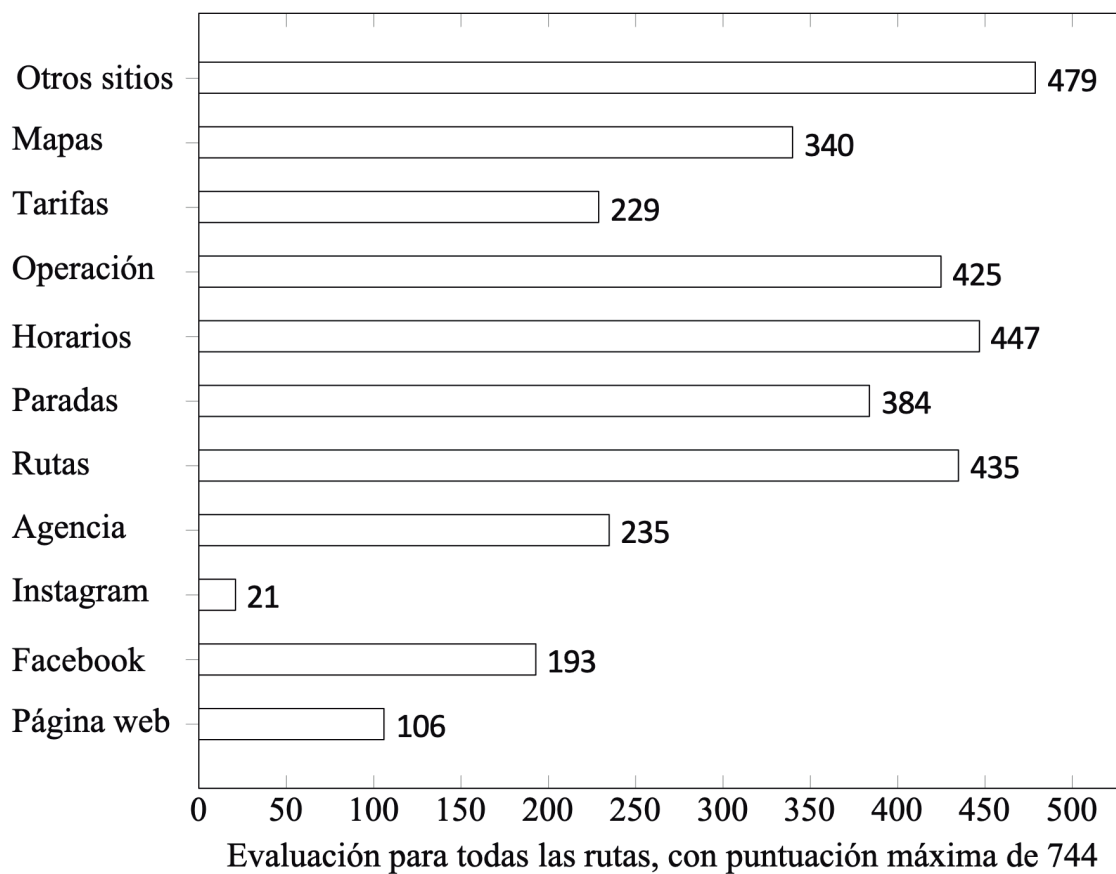


Fig. 12. Síntesis de puntuación de todos los rubros del estudio

IV. CASO DE ESTUDIO: TRANSPORTES SAN GABRIEL

Desde agosto de 2021, la empresa Transportes San Gabriel de Aserrí, S.A., que sirve las rutas de autobús Acosta - San José, Turrujal - San José y San Gabriel - San José, cuenta con una página

web disponible en la dirección <https://transportessangabriel.com/> desarrollada por el trabajo comunal universitario TC-691 “Tropicalización de la tecnología”, en un proyecto coordinado por el profesor Fabián Abarca Calderón de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica.

El sitio recibe una visitación diaria aproximada de 900 personas, según el reporte de Google Analytics, y un total aproximado de 12000 visitantes únicos al mes, con aproximadamente 30 usuarios cada 30 minutos. Un ejemplo de un reporte de visitación está en la figura 13.



Fig. 13. Informe de Google Analytics de visitación al sitio transportessangabriel.com, al 24 de mayo de 2024 El sitio fue desarrollado con datos GTFS, un levantamiento manual que tomó considerables horas de parte de estudiantes de trabajo comunal universitario. Los datos completos GTFS *Schedule* están disponibles en el mismo sitio en <https://transportessangabriel.com/gtfs>.

Según los rubros de evaluación de este estudio, esta página obtiene el mayor puntaje de todas las rutas del país (excluyendo redes sociales). La evaluación no es perfecta si hacemos una comparación con sitios internacionales de referencia, sin embargo, en todos estos aspectos continúa trabajando el proyecto de investigación y el trabajo comunal universitario.

CONCLUSIONES

1. La falta de una fuente centralizada de información del servicio de transporte público en Costa Rica deja la responsabilidad a las empresas concesionarias.
2. Lo anterior crea un vacío y fragmentación de información que impide una visión de “unidad” del servicio, donde las personas usuarias no dependan de las posibilidades de una empresa concesionaria para proveer información oportuna.
3. Además de las políticas, leyes o reglamentos y del financiamiento para buscar un transporte público inteligente, es necesario forjar una visión del servicio y una estrategia de implementación.

REFERENCIAS

- [1] E. Jaffe. <GTFS: The promise of data-driven public transit. > S. Labs, ed. (3 de nov. de 2017), dirección: <https://www.sidewalklabs.com/insights/gtfs-the-promise-of-data-driven-public-transit>.
- [2] Secretaría de Planificación Sectorial, <Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020 - 2035), > Ministerio de Obras Públicas y Transportes, inf. téc., 2020.
- [3] Contraloría General de la República de Costa Rica, <Informe de auditoría operativa sobre la eficacia en la integración operacional y física de los servicios de transporte público y su contribución a la eficiencia del servicio, > Contraloría General de la República de Costa Rica, inf. téc. DFOE-IFR-IF-00012-2019, 26 de nov. de 2019. dirección: [https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs/cgr/2019/SIGYD D 2019021438.pdf](https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs/cgr/2019/SIGYD%202019021438.pdf).
- [4] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, <Política Sectorial de Modernización del Transporte Público Remunerado de Personas Modalidad Autobús, > Ministerio de Obras Públicas y Transportes, inf. téc., 2017.

Concentrador de datos en tiempo real para servicios de información en el transporte público

Real-time Data Hub for Information Services in Public Transportation

Fabián Abarca Calderón
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: fabian.abarca@ucr.ac.cr

Joser David Segura Cruz
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: joser.segura@ucr.ac.cr

Eddy Josué Vargas Céspedes
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: eddy.vargas@ucr.ac.cr

Palabras clave:

API, ARC-IT, arquitecturas tecnológicas, GTFS, transporte público inteligente.

RESUMEN

Este artículo propone el diseño de un servidor web concentrador de datos (*data hub*) y la especificación de una interfaz de programación de aplicaciones (API) llamada *Infobús* v1.0 para la distribución de datos en tiempo real para servicios de información en un sistema inteligente de transporte público, como páginas web, aplicaciones móviles, pantallas, plataformas de análisis de datos y otros. Esto es desarrollado a partir de la investigación de modelos de información, modelos de gestión de datos y modelos de comunicación aptos para el transporte público.

En el plan piloto de un sistema de información para el servicio de buses del campus de la Universidad de Costa Rica, es implementado un subconjunto de la propuesta con el objetivo de recopilar datos para procesamiento y distribución a los servicios de información conectados. Los datos incluyen GTFS *Schedule*, que ofrece datos generales sobre el servicio, y GTFS *Realtime*, con datos en tiempo real, junto con otros datos complementarios que la literatura identifica como relevantes para el servicio.

ABSTRACT

This article proposes the design of a web server *data hub* and the specification of an Application Programming Interface (API) called *Infobús* v1.0 for real-time data distribution for information services in an intelligent public transportation system, such as web pages, mobile applications, screens, data analysis platforms, among others. This is developed based on the research of information models, data management models, and communication models suitable for public transportation.

In the pilot plan of an information system for the bus service on the campus of the University of Costa Rica, a subset of the proposal is implemented with the aim of collecting data for processing and distribution to connected information services. The data includes GTFS Schedule, which provides general service data, and GTFS *Realtime*, with real-time data, along with other complementary data that the literature identifies as relevant to the service.

I. INTRODUCCIÓN

Con tecnologías de información y comunicación, los sistemas inteligentes de transporte público facilitan la recolección y uso de datos masivos provenientes de las agencias operadoras, de equipos y sensores en los vehículos y en la infraestructura [1] y de otras fuentes externas variadas. Estos datos son utilizados para mejorar la operación del sistema, su gestión administrativa, su planificación, su regulación y, prioritariamente, la experiencia de las personas usuarias [2]. Esta es, en general, la implementación de un sistema dinámico basado en datos (DDDAS, *Dynamic Data-Driven Applications Systems*) [3].

Este artículo presenta el diseño y la implementación de un sistema para la recolección de datos abiertos de transporte público y de otros datos complementarios relevantes para el servicio, para su posterior procesamiento, almacenamiento y distribución entre servicios de información como páginas web, pantallas, aplicaciones y plataformas de análisis de datos. Para esto implementamos el servidor web llamado datahub y diseñamos la especificación de la interfaz de programación de aplicaciones (API) que permite a múltiples servicios conectarse con este y extraer información.

Las categorías de datos del API están basados en la arquitectura de referencia para transporte colaborativo e inteligente del Departamento de Transporte de Estados Unidos (ARC-IT, *Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation*) [4] que abarca una gama amplísima de aplicaciones. También utilizamos la referencia del suministro de datos abiertos de transporte público GTFS (*General Transit Feed Specification*), que provee el detalle de muchos de los datos por compartir.

El API diseñado permite una consulta especializada de datos, ofreciendo datos en tiempo real pero también datos históricos, típicamente en la forma de series temporales multivariadas, que pueden ser configuradas según las necesidades del servicio conectado. Esto permite su utilización en una diversidad de aplicaciones, y para el beneficio de distintos actores del sistema, incluyendo personas usuarias, operadores, gestores, planificadores, reguladores, cuerpos de emergencia e investigadores del servicio de transporte público.

En el proyecto en general (que incluye también el servidor realtime mostrado en la figura 1), el diseño está orientado al uso de tecnologías y estándares abiertos, una arquitectura orientada hacia la interoperabilidad, la posibilidad de la participación de múltiples proveedores tecnológicos y la posibilidad de una implementación gradual de complejidad creciente. Todas estas características, a nuestro criterio, son deseables en el contexto de Costa Rica, donde no hay sistemas similares de transporte público inteligente con los beneficios tangibles, de amplio alcance y durables deseados para las personas usuarias, a pesar de otras iniciativas anteriores [5][6].

II. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto consiste en una investigación bibliográfica sobre estándares y arquitecturas de sistemas inteligentes de transporte público, una identificación de las necesidades de los servicios conectados a este sistema y que son relevantes para el transporte público, la investigación y selección de modelos de datos de transporte público en tiempo real, la investigación y selección de un modelo de gestión de datos, la investigación y selección de un modelo de comunicación entre el concentrador de datos y los servicios conectados, el diseño del API (modelo de comunicación elegido) siguiendo una arquitectura REST conforme a la especificación OpenAPI v3.0, el diseño del servidor capaz de implementar el diseño creado, y finalmente la discusión sobre el diseño presentado y el trabajo futuro.

III. ARQUITECTURA DEL CONCENTRADOR DE DATOS

Para diseñar la arquitectura del subsistema de distribución de datos en tiempo real, es esencial seleccionar un *modelo de información* que identifique los datos relevantes para el servicio y su distribución en tiempo real, un *modelo de gestión de datos* que estructure el procesamiento y almacenamiento de los datos, y un *modelo de comunicación* entre el servidor y los servicios conectados para distribuir la información.

También es crucial identificar los *actores del sistema*, es decir, todos los posibles “clientes” de los datos proporcionados, para diseñar el sistema según sus necesidades. Además, se debe discutir varios *servicios de información* a los que el sistema propuesto puede proveer datos.

El trabajo presentado en este artículo es parte del sistema de información descrito en la figura 1.

A. Modelos de información

Para diseñar el sistema propuesto es importante utilizar modelos de información específicos del dominio de transporte público y ciudades inteligentes en general. De esta forma es que conseguimos “poner nombre” a los datos, y encontrar las relaciones entre ellos. Las fuentes más importantes son:

GTFS La especificación del suministro de datos abiertos de transporte público (GTFS, *General Transit Feed Specification*) [7] es la referencia más importante puesto que la función primaria de este subsistema es proveer datos para sistemas de información para personas usuarias, y GTFS es, precisamente, la especificación *de facto* para estos datos. GTFS es consumido principalmente por aplicaciones de planificación de viajes multimodales como Google Maps, Moovit, TransitApp y muchas otras.

ARC-IT La referencia de arquitectura de transporte inteligente y colaborativo del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (ARC-IT, *Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation*) [4] es un modelo exhaustivo de los sistemas tecnológicos del transporte inteligente, desarrollado desde distintas perspectivas. ARC-IT establece objetos, funcionalidades, relaciones, estándares y una gran cantidad de información de referencia. En este trabajo fue utilizado para

ayudar a establecer los componentes (como servidores y otros dispositivos) y sus flujos de información con una fuente, mensaje y destino.

Smart Data Models SDM es una iniciativa que sistematiza la *información de contexto* en varias áreas de relevancia industrial, comercial y académica, como ciudades inteligentes, agricultura de precisión y muchos otros [8]. Smart Data Models utiliza NGSI-LD (*Next Generation Service Interface with Linked Data*), un estándar del Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*) para proveer datos estructurados de contexto, que define entidades, relaciones y propiedades dentro de un área del conocimiento. Nótese que las definiciones en SDM están basadas en otros estándares comunes, incluyendo el mismo GTFS, por lo que constituye una valiosa fuente de estructuración de la información.

Protocolo Común de Alerta El Protocolo Común de Alerta (CAP, *Common Alerting Protocol*) [9] es una opción recomendada para la especificación de los datos suministrados en sistemas de alertas. Es creado y promovido por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), avalado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y utilizado por la Cruz Roja y otras organizaciones.

Recomendaciones de organismos estatales y regulatorios El Consejo de Investigación en Transporte (TRB, *Transportation Research Board*) de la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos tiene el Comité Permanente sobre Datos de Transporte Público (AP090) [10] que hace recomendaciones sobre el uso de datos, entre ellos GTFS, para su máximo aprovechamiento. Existen otras instancias de propósitos similares en el mundo.

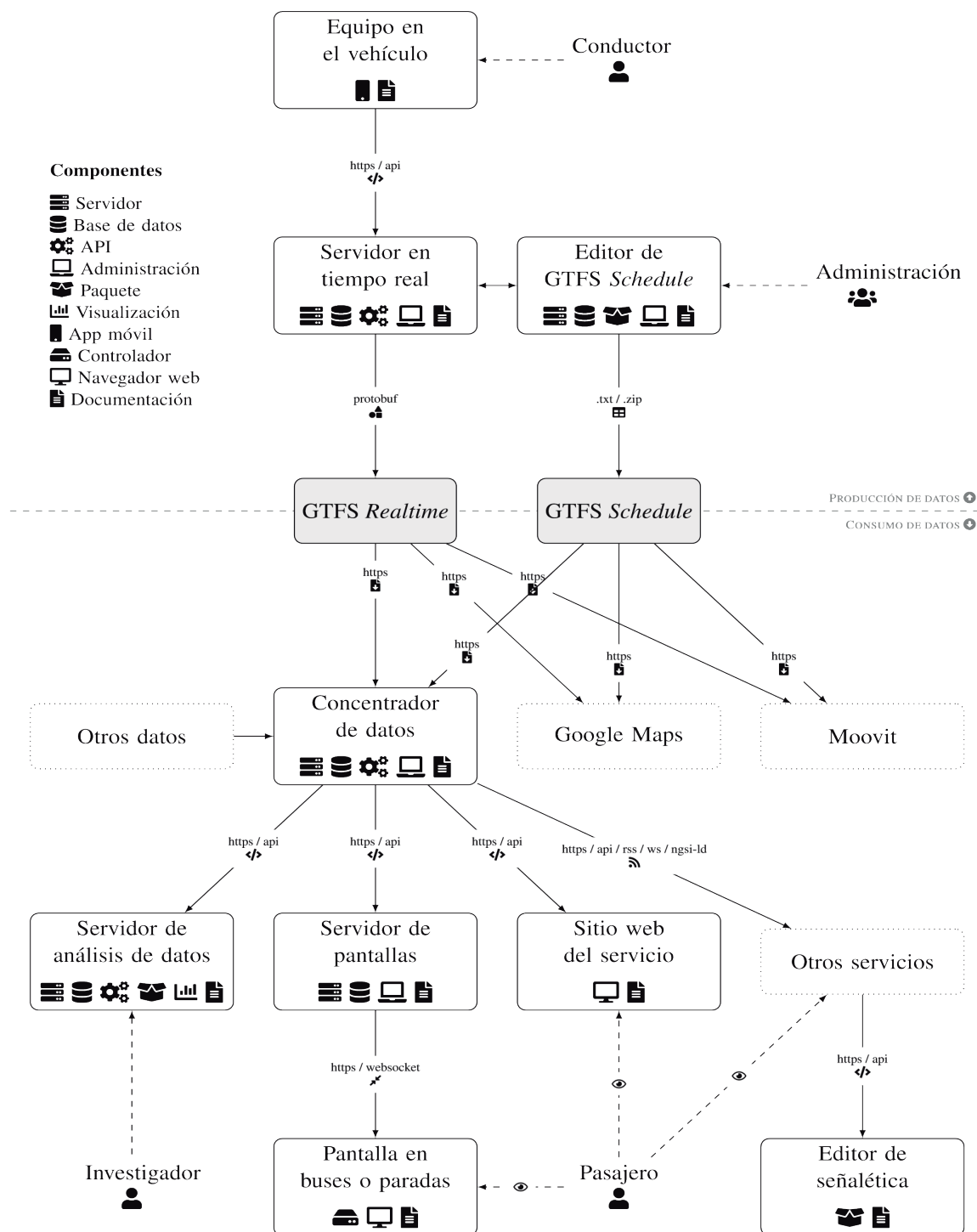


Fig. 1. Diagrama tecnológico de la implementación del sistema de información para BUCR

B. Modelos de gestión de datos

La forma en que el sistema obtiene, procesa, almacena y distribuye los datos que contiene cambia según las necesidades y tecnologías disponibles. En general, para el análisis de datos existen

varias categorías, con definiciones flexibles, que son útiles para orientar el diseño de la arquitectura y sus componentes.

Lago de datos (*data lake*) Almacena *datos desestructurados o semi estructurados* de fuentes distintas, posiblemente con formatos heterogéneos, mantenidos en su formato original [11]. Los datos no tienen un valor conocido para el sistema y siguen el concepto de “cargar los datos ahora y analizarlos luego” [12].

Almacén de datos (*data warehouse*) Administra *información estructurada* que facilita los procesos analíticos. En estos la información ha sido extraída, cargada y transformada (ELT, *Extract, Load, Transform*) de manera que es posible hacer consultas y análisis eficientes para tomar decisiones informadas [13].

Concentrador de datos (*data hub*) Gestiona *datos heterogéneos pero estructurados y armonizados* y está optimizado para su integración con tecnologías de ciencia e ingeniería de datos. Actúa como un repositorio central para datos recopilados y datos generados, típicamente con posibilidades de visualización [14].

En nuestro sistema optamos por el modelo de un concentrador de datos, dado que vamos a recopilar datos, generar otros e interactuar con varios servicios de análisis y visualización.

C. Modelos de comunicación entre servicios

Hay varias posibilidades en que los servicios conectados a nuestro sistema pueden obtener información.

Solicitud/respuesta (*request/response*) Un *cliente* hace una *solicitud* a un *servidor*, el cual envía de vuelta una respuesta [15]. HTTP es un ejemplo y los web API un caso especial, actualmente la opción más popular para intercambio de datos entre servicios, especialmente con arquitecturas REST o GraphQL. Esta opción presenta algunas limitaciones para las comunicaciones en tiempo real, debido a que la comunicación siempre es iniciada por el cliente, y por tanto son más difíciles las notificaciones de parte del servidor.

Orientada a eventos (*event-driven*) En la arquitectura orientada a eventos (EDA, *Event-driven Architecture*) la generación de un evento puede desencadenar la invocación de uno o más servicios desacoplados [16][17].

Publicación/suscripción (*pub/sub*) Un *publicador* genera *mensajes* sobre eventos para ser propagados a *suscriptores* que reciben la información por medio de *canales* dedicados a *tópicos* específicos. MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) es un ejemplo popular para sistemas en tiempo real.

La elección depende de varios factores, como la dependencia crítica del tiempo, la tolerancia a la latencia y la red de comunicación utilizada. El modelo de comunicación elegido para el sistema concentrador de datos es un **web API** tipo REST siguiendo la especificación OpenAPI v3.0.

D. Actores del sistema y servicios conectados

En el sistema de transporte público en Costa Rica participan al menos los siguientes actores: personas usuarias, operadores (empresas autobuseras), gestores (Consejo de Transporte Público), planificadores (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), reguladores (Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos), servicios de emergencia (Comisión Nacional de Atención y Prevención de Emergencias), investigadores (academia y prensa), entre otros.

Las necesidades de datos de cada uno son distintas. Por ejemplo, es posible separarlos según “horizontes de interés”. Para una persona usuaria, típicamente es necesario conocer datos sobre el servicio en los próximos minutos y horas. Para el operador del servicio es útil tener predicciones en el orden de horas y días. Gestores y planificadores pueden estar interesados en datos históricos y predicciones para los próximos días y meses o años. Hemos diseñado el concentrador para proveer datos para al menos los siguientes servicios:

Sitio web Una página informativa en internet que típicamente muestra horarios, mapas, tarifas, alertas del servicio, información de contacto y otros datos relevantes para las personas usuarias.

Aplicaciones móviles Con funciones similares al de la página web, sin embargo, en el plan piloto no será implementada ninguna aplicación móvil propia, pero sí serán habilitadas otras como Google Maps.

Pantallas en infraestructura y en vehículos Son útiles para la información inmediata de quienes están usando el servicio y permiten la orientación dentro del sistema, tanto en vehículos como en infraestructura.

Plataformas de análisis de datos Para la planificación, regulación o investigación del servicio es relevante implementar métodos de análisis con datos históricos para tareas de predicción o detección de anomalías.

Sistema de emergencias Como parte de una *ciudad inteligente*, el sistema de transporte público puede interactuar con los servicios de atención y prevención de emergencias para enviar y recibir alertas.

E. Descripción de los datos del concentrador

Existen varios tipos de fuentes de la información que influyen en la operación, rendimiento u otros factores del sistema [18]. Por ejemplo, datos obtenidos dentro del sistema son aquellos provenientes de un sistema automático de localización de vehículos (AVL, *Automated Vehicle Location*) [19], sensores de diferentes tipos colocados en diversas localizaciones para obtener información, conteo de pasajeros automatizado (APC, *Automated Passenger Count*) [20], y recolección automatizada de tarifas (AFC, *Automated Fare Collection*) [19].

Por otro lado, los datos de fuentes externas incluyen redes sociales como Facebook, Instagram, Twitter, TikTok, entre otras [21] junto con datos históricos y predicciones del tiempo atmosférico [22][23].

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El servidor datahub está implementado con un sistema operativo Linux Ubuntu 22.04 LTS, la base de datos geoespacial PostgreSQL 14 con la extensión PostGIS, el lenguaje de programación Python 3.11, la plataforma de *backend* Django v5.0, el módulo Django REST Framework v3.15.1 para el API, el administrador y planificador de tareas Celery v5.3.6 y el intermediador de mensajes Redis v5.0.1.

Este es un proyecto de código abierto. El repositorio está disponible en GitHub en la dirección <https://github.com/fabianabarca/datahub> y su documentación está en <https://fabianabarca.github.io/datahub>. El proyecto está alojado en el servidor de prueba <https://datahub.bucr.digital>.

A. Diseño de la interfaz de programación de aplicaciones (API)

La API *Infobús* v1.0, diseñada según OpenAPI v3.0, proporciona varias terminales (*endpoints*) para el intercambio de información en tiempo real, datos históricos y descriptivos, así como datos complementarios de interés para diversos actores. Esta API está diseñada para analizar comportamientos y patrones de movilidad en el transporte público, identificando oportunidades de mejora y mitigación de sucesos. Puede ser utilizada por desarrolladores, científicos de datos y en ámbitos empresariales y administrativos, ofreciendo datos según las necesidades específicas de cada usuario o servicio. La documentación completa del web API está disponible en <https://datahub.bucr.digital/api/docs/>.

CONCLUSIONES

1. Este artículo propone una arquitectura tecnológica para implementar un servidor de concentración y distribución basado en el modelo data hub, que organiza datos de diversos modelos de información y satisface las necesidades de diferentes servicios en un sistema inteligente de transporte público, utilizando una web API como modelo de comunicación.
2. El concentrador de datos habilita distintos servicios de información para las personas usuarias pero también facilita la creación de sistemas de canalización de flujos de datos para ingeniería y ciencia de datos.
3. Fue realizada una implementación de esta propuesta para pruebas dentro del plan piloto del sistema de información de los buses de la Universidad de Costa Rica.
4. A pesar de la relevancia de este tipo de sistemas tecnológicos para todas las partes involucradas en el sistema de transporte público, el Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020 - 2035) [24] –que actualmente constituye una referencia importante para el desarrollo del sector en el país– no menciona explícitamente en sus 41 indicadores nada relacionado con las tecnologías de información y comunicación en el transporte público, revelando un vacío en la política pública sobre este tema.

5. Para diseñar sistemas tecnológicos de transporte público, adoptamos los principios de interoperabilidad de datos de movilidad (MDIP, *Mobility Data Interoperability Principles*) [25] establecidos por una asociación de agencias de transporte de EE. UU. Estos principios promueven la interoperabilidad, el uso de estándares abiertos, el acceso a herramientas con datos de alta calidad, la selección de componentes tecnológicos adecuados y el empoderamiento del público con datos bien distribuidos.

REFERENCIAS

- [1] M. Alam, J. Ferreira y J. Fonseca, eds., *Intelligent Transportation Systems, Dependable Vehicular Communications for Improved Road Safety*. Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-31928183-4.
- [2] W. Barfield y T. A. Dingus, *Human factors in intelligent transportation systems*. Psychology Press, 1998. DOI: 10.4324/9781315806624.
- [3] F. Sun, A. Dubey, J. White y A. Gokhale, «Transit-hub: a smart public transportation decision support system with multi-timescale analytical services,» *Cluster Computing*, vol. 22, n.o S1, págs. 2239-2254, feb. de 2018, ISSN: 1573-7543. DOI: 10.1007/s10586-018-1708-z.
- [4] U.S. Department of Transportation. «Architecture Reference for Cooperative and Intelligent Transportation (ARC-IT) v9.2, The National ITS Reference Architecture.» (2024), dirección: <http://www.arc-it.net/>.
- [5] M. Cordero Parra, «Sistemas inteligentes permitirán vigilancia y control del transporte público,» *Semanario Universidad*, 26 de abr. de 2018. dirección: <https://semanariouniversidad.com/ultima-hora/sistemasinteligentes-permitiran-vigilancia-y-control-del-transporte-publico/>.
- [6] J. A. Céspedes, «Nueva app de Incofer informa sobre horas de llegada y posibles retrasos de tren,» *La Nación*, 19 de jul. de 2021. dirección: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/nueva-app-de-incoferinforma-sobre-horas-de/77VIHEFUWBD5RCOTXFM4KL4XO4/story/>.
- [7] MobilityData, ed. «GTFS Overview.» (2024), dirección: <https://gtfs.org/>.
- [8] Smart Data Models Program. «Smart Data Models.» (2024), dirección: <https://smartdatamodels.org/>.
- [9] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. «The Common Alerting Protocol (CAP).» (2024), dirección: <https://www.undrr.org/early-warnings-for-all/common-alerting-protocol>.
- [10] Transportation Research Board. «Standing Committee on Transit Data - AP090.» (2024), dirección: <https://www.trb-transit-data.org/>.
- [11] A. Nambiar y D. Mundra, «An Overview of Data Warehouse and Data Lake in Modern Enterprise Data Management,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 6, n.o 4, 2022, ISSN: 2504-2289. DOI: 10.3390/bdcc6040132. dirección: <https://www.mdpi.com/2504-2289/6/4/132>.
- [12] H. Fang, «Managing data lakes in big data era: What's a data lake and why has it become popular in data management ecosystem,» en *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, 2015, págs. 820-824. DOI: 10.1109/CYBER.2015.7288049.
- [13] T. C. Hammergren, *Data Warehousing for dummies*. John Wiley & Sons, 2009.
- [14] V. Gadepally y J. Kepner, «Building a Working Data Hub,» abr. de 2020.
- [15] S. Kumar, «A Review on Client-Server based applications and research opportunity,» *International Journal of Recent Scientific Research*, vol. 10, n.º 7, págs. 33857-3386, 2019.

- [16] L. Lan, B. Wang, L. Zhang, R. Shi y F. Li, «An Event-driven Service-oriented Architecture for Internet of Things Service Execution,» *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, vol. 11, mar. de 2015. DOI: [10.3991/ijoe.v11i2.3842](https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i2.3842).
- [17] A. Rahmatulloh, F. Nugraha, R. Gunawan e I. Darmawan, «Event-Driven Architecture to Improve Performance and Scalability in Microservices-Based Systems,» en *2022 International Conference Advancement in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS)*, 2022, págs. 01-06. DOI: [10.1109/ICADEIS56544.2022.10037390](https://doi.org/10.1109/ICADEIS56544.2022.10037390).
- [18] T. F. Welch y A. Widita, «Big data in public transportation: a review of sources and methods,» *Transport Reviews*, vol. 39, n.o 6, págs. 795-818, mayo de 2019, ISSN: 1464-5327. DOI: [10.1080/01441647.2019.1616849](https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1616849).
- [19] H. N. Koutsopoulos, P. Noursalehi, Y. Zhu y N. H. M. Wilson, «Automated data in transit: Recent developments and applications,» en *2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, IEEE, jun. de 2017. DOI: [10.1109/mtits.2017.8005585](https://doi.org/10.1109/mtits.2017.8005585).
- [20] K. Zimmer, H. Kurban, M. Jenne, L. Keating, P. Maull y M. Dalkilic, «Using Data Analytics to Optimize Public Transportation on a College Campus,» en *2018 IEEE 5th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, IEEE, oct. de 2018. DOI: [10.1109/dsaa.2018.00059](https://doi.org/10.1109/dsaa.2018.00059).
- [21] M. Itoh, D. Yokoyama, M. Toyoda, Y. Tomita, S. Kawamura y M. Kitsuregawa, «Visual fusion of mega-city big data: An application to traffic and tweets data analysis of Metro passengers,» en *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, IEEE, oct. de 2014. DOI: [10.1109/bigdata.2014.7004260](https://doi.org/10.1109/bigdata.2014.7004260).
- [22] Y. Wang, Y. Bie y Q. An, «Impacts of Winter Weather on Bus Travel Time in Cold Regions: Case Study of Harbin, China,» *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 144, n.o 11, nov. de 2018, ISSN: 2473-2893. DOI: [10.1061/jtepb.0000198](https://doi.org/10.1061/jtepb.0000198).
- [23] S. Najafabadi, A. Hamidi, M. Allahviranloo y N. Devineni, «Does demand for subway ridership in Manhattan depend on the rainfall events?» *Transport Policy*, vol. 74, págs. 201-213, feb. de 2019, ISSN: 0967-070X. DOI: [10.1016/j.tranpol.2018.11.019](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.019). dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.019>.
- [24] Secretaría de Planificación Sectorial, «Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020 - 2035),» Ministerio de Obras Públicas y Transportes, inf. téc., 2020.
- [25] MDIP. «Modernizing transit technology with open standards.» (15 de ago. de 2023), dirección: <https://www.interoperablemobility.org/>.

Sistema de información para las personas usuarias del transporte público en Costa Rica

Information System for Public Transportation Users in Costa Rica

Fabián Abarca Calderón
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: fabian.abarca@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Diseño de servicios, GTFS, ingeniería de sistemas, transporte público inteligente

RESUMEN

La información para las personas usuarias del transporte público es un factor esencial para aumentar su utilización y para mejorar su satisfacción con el servicio. Este artículo hace la propuesta de una arquitectura tecnológica y una estrategia organizacional para atender la deficiencia de disponibilidad de información del servicio de transporte público en Costa Rica.

La propuesta del sistema de información presenta siete componentes, complementarios entre sí, necesarios para aumentar sustancialmente la eficacia y el alcance de la información provista. Los componentes desarrollados son: datos abiertos y estandarizados del servicio, medios electrónicos de difusión, medios impresos de difusión, medios de atención al cliente, sistema de identidad visual, campañas de comunicación y, finalmente, tecnologías de telemetría y rastreo de vehículos en tiempo real.

Para la ejemplificación de estos componentes, es presentado el plan piloto para el servicio de buses del campus central de la Universidad de Costa Rica, hecho con base en estándares y modelos de referencia internacionales, bajo principios de interoperabilidad y neutralidad tecnológica en su arquitectura.

ABSTRACT

Information for public transportation users is an essential factor for increasing its utilization and improving user satisfaction with the service. This article presents a proposal for a technological architecture and organizational strategy to address the deficiency of available information about the public transportation service in Costa Rica.

The proposed information system includes seven components, complementary to each other, necessary to substantially increase the effectiveness and reach of the provided information. The developed components are: open and standardized service data, electronic dissemination media, printed dissemination media, customer service channels, visual identity system, communication campaigns, and, finally, real-time vehicle telemetry and tracking technologies.

To exemplify these components, the pilot plan for the bus service at the main campus of the University of Costa Rica is presented, based on international standards and reference models, and guided by principles of interoperability and technological neutrality in its architecture.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas inteligentes de transporte público utilizan tecnologías de información y comunicación para facilitar la recolección y uso de datos masivos con diferentes objetivos y públicos meta [1]. Los *sistemas de información*, por su parte, son estrategias y tecnologías que ofrecen información oportuna y canales de comunicación a las personas usuarias para utilizar eficazmente el servicio [2] antes, durante y después de un viaje.

Este artículo describe una arquitectura tecnológica y una estrategia organizacional para abordar de forma integral el problema de la disponibilidad de información para utilizar el servicio.

La propuesta busca responder preguntas como:

- ¿Cómo ser compatibles con aplicaciones de planificación de viajes intermodales –como Google Maps, Moovit o Transit App– y otros servicios que consumen y despliegan datos del transporte público en sitios web, aplicaciones o pantallas, ampliando así la oferta disponible para las personas usuarias?
- ¿Cómo crear un sistema de información que no esté limitado a unos componentes tecnológicos aislados sino uno que sea parte de una estrategia integral de atención y satisfacción de las personas usuarias?
- ¿Cómo maximizar el aprovechamiento de los datos recopilados, para que sean utilizados también para la operación (empresas concesionarias), gestión (CTP), planificación (MOPT), regulación (ARESEP) e investigación (academia y prensa) del servicio, entre múltiples usos posibles?
- ¿Cómo reducir los costos iniciales del sistema, habilitando una implementación gradual y ofreciendo alternativas de bajo costo para las etapas iniciales?
- ¿Cómo promover en la implementación del sistema la participación y competencia de distintos proveedores tecnológicos, así como la libertad de elegir los componentes mejor adaptados a las necesidades para evitar la monopolización innecesaria del servicio?

Para atender estas preguntas, es necesario comenzar con la adopción de ciertos principios de diseño, que son:

Interoperabilidad para ser compatibles con estándares y arquitecturas internacionales [3] y facilitar en el presente y en el futuro la modernización y actualización del sistema.

Neutralidad tecnológica para evitar el *vendor lock-in* (uso restringido o propietario de una tecnología o servicio), en el cual un distribuidor de una marca tiene un control manipulador –a menudo extorsivo– de todo el sistema, lo cual es una ocurrencia típica en grandes sistemas informáticos en el país.

Unicidad del sistema para evitar fraccionamiento de la información por causa de la multiplicidad de empresas concesionarias y la atomización de la administración del transporte público en el país, lo cual no debe ser un obstáculo para la calidad de la información para las personas usuarias.

La propuesta adopta los principios de interoperabilidad de datos de movilidad (MDIP, *Mobility Data Inter- operability Principles*) [4] establecidos por una asociación de agencias de Estados Unidos

líderes en transporte público inteligente. En esencia, estos principios promueven la interoperabilidad por medio del desarrollo, la adopción y la implementación generalizada de estándares abiertos, el acceso a herramientas con datos de movilidad de alta calidad, la posibilidad de seleccionar los componentes tecnológicos mejor adaptados a las necesidades y el empoderamiento del público general con datos de movilidad de calidad y bien distribuidos.

II. METODOLOGÍA DE DISEÑO

La propuesta está desarrollada con base en la investigación sobre transporte público inteligente y sus estándares y arquitecturas tecnológicas, También con base en la experiencia en los estándares GTFS *Schedule* y *Realtime* [5], en la investigación en técnicas modernas de análisis de datos, en las buenas prácticas de diseño de software y en diseño de servicios en general.

Los ejemplos provienen del plan piloto del sistema de información para el servicio de buses en el campus central de la Universidad de Costa Rica (UCR), desarrollado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica y la Oficina de Servicios Generales de la UCR, en asociación con otras instancias internas y externas.

III. SISTEMAS DE INFORMACIÓN PARA EL TRANSPORTE PÚBLICO

Según nuestra definición, los sistemas de información en el transporte público son un conjunto de canales de comunicación y tecnologías que permiten a las personas usuarias conocer los detalles del servicio necesarios para su utilización efectiva.

Esto implica que un “sistema de información del servicio” es un conjunto de aplicaciones más amplio que solamente, por ejemplo, la plataforma tecnológica que habilita la telemetría y el rastreo en los autobuses o una aplicación móvil con los horarios.

En cambio, un sistema de información comprende un conjunto de canales de comunicación, una visión del servicio, y una estrategia de implementación tecnológica que procura maximizar su utilidad y alcance entre las personas usuarias y otros actores del sistema.

A. Componentes del sistema de información

En esta propuesta hay siete componentes, presentados aquí en orden de prioridad de implementación:

1. Datos abiertos y estandarizados del servicio
2. Medios *electrónicos* para difusión de información, incluyendo:
 - Página web
 - Aplicaciones móviles (propias y de terceros)
 - Pantallas informativas
3. Medios *impresos* para difusión de información y para promoción, incluyendo:

- Rotulación (señalética)
- Folletos y vallas informativas
- 4. Medios de atención al cliente
- 5. Sistema de identidad visual
- 6. Campañas de comunicación
- 7. Tecnologías de telemetría y rastreo de vehículos para información en tiempo real

A continuación, hay un desarrollo de cada uno de estos elementos junto con el ejemplo de nuestra implementación en el sistema de buses de la Universidad de Costa Rica, denominado **bUCR**.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Datos abiertos y estandarizados

Un sistema de información de un servicio público debe procurar la máxima difusión de los datos relacionados con su operación. Así, la principal recomendación es proveer datos abiertos del servicio en formato estandarizado para distribución y uso en aplicaciones digitales, propias y de terceros. La difusión de estos datos ha creado significativo valor social y económico en casos exitosos como los de la Ciudad de México [3] y Londres [6].

Actualmente, el estándar de *facto* para la publicación de datos abiertos del servicio de transporte público alrededor del mundo es GTFS (*General Transit Feed Specification*) [7]. Existen otros pocos estándares de este tipo, como en Reino Unido (NeTEx, *Network Timetable Exchange*), pero de uso más restringido.

El suministro de datos “estáticos” o *feed* llamado GTFS *Schedule* consiste en un archivo comprimido .zip que contiene una serie de documentos .txt con formato de valores separados por coma. Representan una base de datos *relacional*. Su actualización ocurre cada vez que hay algún cambio en el servicio como horarios o tarifas, y esto sucede en el orden de días, semanas o meses.

El suministro de datos en tiempo real o *feed message* llamado GTFS *Realtime* consiste en un conjunto de archivos binarios tipo *protobuf* (.pb) que son actualizados cada aproximadamente 10, 20 o 30 segundos. Estos datos son complementarios y dependientes a GTFS *Schedule* y ofrecen información más precisa sobre el estado actual del servicio.

Cada archivo de GTFS *Realtime* contiene una *entidad*, y son clasificados de la siguiente forma:

VehiclePositions Entidad que especifica información como la posición geoespacial del vehículo, su nivel de ocupación de pasajeros y el nivel de congestión vial, entre otros. Estos datos son recopilados y suministrados por el *equipo electrónico* en los vehículos.

TripUpdates Entidad que actualiza los tiempos estimados de llegada a las paradas para cada viaje y avisa cancelaciones o cambios de ruta. Estos datos son calculados y suministrados por el *servidor* en tiempo real.

Alerts Entidad que informa sobre afectaciones al servicio, como cambios de paradas, interrupciones de la vía pública, eventos inesperados y otros. Estos datos son editados y suministrados por la *agencia operadora* del servicio, con intervención humana.

Información necesaria para el servicio En concordancia con GTFS, que representa una referencia consolidada globalmente, este artículo propone que un sistema de información del servicio debe proveer información en, al menos, las siguientes siete categorías:

Agencia operadora Información de contacto y medios de atención al cliente

Rutas Códigos, nombres, descripción y colores que ayudan a la identificación

Paradas Ubicación, infraestructura, facilidades, seguridad y accesibilidad

Viajes y horarios Tiempos de salida de cada viaje y de preferencia para cada parada

Días de operación Especificación de rangos de operación semanal y estacional y cambios en feriados

Tarifas Detalles del precio, métodos de compra y de pago

Datos geoespaciales y mapas Mapas de los recorridos de las rutas y ubicación de las paradas

El objetivo es que con esta información, las personas sin conocimiento previo de las rutas pueden usarlas fácilmente. Si, además, los medios de difusión son apropiados, tendrá un alcance mucho mayor con las consideraciones apropiadas de accesibilidad y género [8].

Implementación en el sistema bUCR En el sistema de información de la UCR hay una plataforma de edición de GTFS *Schedule* y un servidor que provee los datos de GTFS *Realtime*. Esto es consumido por otras aplicaciones propias y de terceros.

B. Medios electrónicos para difusión de información

La primera expectativa de un sistema de información en un sistema inteligente de transporte público es el uso de tecnologías modernas de comunicación [9]. A continuación, hay tres opciones, las cuales, valga decir, pueden ser desarrolladas por terceras partes, gracias a la existencia de datos abiertos y estandarizados.

Página web Una página web puede ser el pilar central de información del servicio. Esto por la versatilidad de las plataformas web, la capacidad de rápidas actualizaciones y el amplio acceso que existe en el país a internet desde computadoras o teléfonos móviles.

Aplicaciones móviles Para optimizar la experiencia en teléfonos móviles, es posible desarrollar aplicaciones que consuman los datos abiertos y estandarizados del servicio. Opciones populares incluyen Google Maps, Moovit y TransitApp.

Pantallas informativas Los tiempos de espera son uno de los factores más sensibles para las personas usuarias. Los estudios han demostrado que una estimación precisa de los tiempos de llegada mejora la percepción de la calidad del servicio [10]. Tanto la página web como las aplicaciones y, particularmente, las pantallas ayudan en este sentido a quienes están usando el servicio.

Implementación en el sistema bUCR Para los buses internos de la Universidad de Costa Rica desarrollamos una página web, disponible en <https://bus.ucr.ac.cr/> y pantallas para las paradas de buses, que despliegan información en tiempo real a partir de GTFS y otras fuentes de datos. No desarrollamos una aplicación para las personas usuarias por la existencia ya de otras opciones consolidadas.

C. Medios impresos para difusión de información y para promoción

Antes de las aplicaciones de mapas digitales había mapas de papel, y eran comunes para orientarse en los sistemas de transporte público de grandes ciudades. Todavía el desarrollo de material de este tipo puede ser de utilidad para ciertas personas usuarias, según sus preferencias personales. Igualmente, la promoción del servicio de transporte público, como cualquier otro servicio, puede ser hecha de esta forma.

Implementación en el sistema bUCR El plan piloto incluye material impreso para distribución como guía de uso de las nuevas características del sistema. En conjunto con la Tienda Línea U existe la intención de desarrollar productos promocionales como tazas, broches y otros con alegorías al sistema de buses.

D. Medios de atención al cliente

Como un abordaje integral de atención y satisfacción de las personas usuarias, es necesario abrir canales efectivos de comunicación bidireccional [11], para la atención de sugerencias, observaciones, quejas, y demás. Las opciones tradicionales son el correo electrónico, chat, pero también es posible crear eventos de atención directa de clientes, como foros comunitarios.

Implementación en el sistema bUCR El plan piloto habilita el correo bus@ucr.ac.cr para atención de consultas. Además, y como parte de los estudios de satisfacción de las personas usuarias, ya hemos hecho encuestas de satisfacción y habrá grupos focales para conocer mejor la experiencia dentro del sistema.

E. Sistema de identidad visual y señalética

Como en cualquier servicio, la identidad visual juega un rol clave en la familiarización de las personas con el servicio. Mantener la consistencia en sus signos facilita el aumento de la confianza y de la creación de una identidad [12]. Los usos de un sistema de identidad visual son múltiples – desde rotulación hasta artículos promocionales– y, en general, puede considerarse una inversión con beneficios importantes.

Señalética En particular, la identidad visual orienta el diseño del sistema de *señalética* o rotulación (en inglés, *wayfinding*), que es el conjunto de signos que orientan a las personas en el espacio y en el uso de servicios. Alrededor del mundo, los sistemas de señalética del transporte público en las grandes ciudades tienen diseños icónicos que forman parte de la identidad de la ciudad.

Ámbito de aplicación El sistema de señalética debe ser utilizado de forma consistente en los siguientes espacios, físicos y virtuales:

- Rotulación en paradas de buses
- Rotulación en los vehículos
- Material impreso, artículos promocionales y/o uniformes
- Página web del sistema
- Datos abiertos estandarizados para uso de aplicaciones de movilidad

Implementación en el sistema bUCR Fue desarrollado un conjunto de elementos que identifican al sistema, sitio web, pantallas y la rotulación para paradas y otros lugares. Todos los detalles del sistema de señalética están en el sitio <https://fabianabarca.github.io/senaletica/>.



Fig. 1. Rótulo de una parada con el símbolo b del sistema

F. Campaña de comunicación

Es necesario informar y educar a las personas usuarias del servicio por todos los medios posibles, en ese sentido, una campaña de comunicación con un manejo profesional, utilizando distintos canales y medios audiovisuales [13], por ejemplo, pueden hacer una gran diferencia en la relación del servicio con la sociedad.

Implementación en el sistema bUCR El trabajo comunal universitario TC-691 “Tropicalización de la tecnología”, en asociación con la Oficina de Servicios Generales y la Rectoría, está en el proceso de implementación de una campaña en las redes sociales de la Universidad de Costa Rica, para concientizar sobre la importancia del transporte público y educar sobre el funcionamiento del servicio de buses del campus universitario, para acercar más personas a utilizarlo.

G. Tecnologías de telemetría y rastreo de vehículos para información en tiempo real

El componente de mayor complejidad tecnológica es también uno de los más apreciados entre las personas usuarias del servicio [14]. Este último componente ofrece un elemento que impulsa múltiples beneficios para múltiples actores del sistema, más allá de las personas usuarias: operadores, gestores, planificadores, reguladores, investigadores, servicios de emergencia, entre otros.

Implementación en el sistema bUCR Como implementación básica de un equipo de rastreo, en el plan piloto desarrollamos la aplicación móvil *Databús*, que comparte la ubicación del vehículo con el servidor en tiempo real, que luego distribuye como datos GTFS *Realtime*.

CONCLUSIONES

Este artículo propone una sistematización de los componentes de un sistema de información para personas usuarias del transporte público, para maximizar su utilización y satisfacción con el servicio.

La propuesta es un elemento útil en la discusión para forjar una visión del servicio y una estrategia de implementación tecnológica y organizacional, así como para debatir la legislación o reglamentación necesaria.

Un sistema de información es solamente una de las transformaciones que necesita el transporte público en Costa Rica, pero es quizá la más accesible desde el punto de vista logístico, técnico y económico.

REFERENCIAS

- [1] M. Visan, S. L. Negrea y F. Mone, < Towards intelligent public transport systems in Smart Cities - Collaborative decisions to be made,> *Procedia Computer Science*, vol. 199, págs. 1221-1228, 2022. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.155.
- [2] W. Barfield y T. A. Dingus, *Human factors in intelligent transportation systems*. Psychology Press, 1998. DOI: 10.4324/9781315806624.
- [3] T. Davies, S. B. Walker, M. Rubinstein y F. Perini, eds., *The State of Open Data: Histories and Horizons*. African Minds e International Development Research Centre, 2019, ISBN: 9781928331957. DOI: 10.47622/ 9781928331957. dirección: <https://stateofopendata.od4d.net/>.
- [4] MDIP. < Modernizing transit technology with open standards.> (24 de mayo de 2024), dirección: <https://www.interoperablemobility.org/>.
- [5] E. Jaffe. < GTFS: The promise of data-driven public transit.> S. Labs, ed. (3 de nov. de 2017), dirección: <https://www.sidewalklabs.com/insights/gtfs-the-promise-of-data-driven-public-transit>.
- [6] Deloitte, < Assessing the value of TfL's open data and digital partnerships,> rep. de inv., 3 de jul. de 2017.
- [7] MobilityData, ed. < GTFS Overview.> (2024), dirección: <https://gtfs.org/>.
- [8] G. Cob, É. Anchía, G. Chacón et al., < Análisis de género del sector transporte en Costa Rica,> GIZ, rep. de inv., nov. de 2018.
- [9] B. Caulfield y M. O'Mahony, < An Examination of the Public Transport Information Requirements of Users,> *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 8, n.o 1, págs. 21-30, mar. de 2007, ISSN: 1524-9050. DOI: 10.1109/tits.2006.888620.
- [10] A. Moreno, I. Salaberria y D. López-de-Ipiña, < New Approaches in User Services Development for Mul- timodal Trip Planning,> en *Intelligent transport systems: technologies and applications*, A. Perallos, U. Hernandez-Jayo, E. Onieva e I. J. G. Zuazola, eds. John Wiley & Sons, 2015, cap. 16. DOI: 10.1002 / 9781118894774.
- [11] L. Penin, *An introduction to service design: designing the invisible*. Bloomsbury Publishing, 2018.
- [12] S. Hurley, < Transit Signage System Design: Theory and Practice,> 2014.
- [13] V. Magginas, M. Karatsoli, G. Adamos y E. Nathanail, < Campaigns and awareness-raising strategies on sustainable urban mobility,> en *Data Analytics: Paving the Way to Sustainable Urban Mobility:*

Proceedings of 4th Conference on Sustainable Urban Mobility (CSUM2018), 24-25 May, Skiathos Island, Greece, Springer, 2019, págs. 264-271.

- [1] K. E. Watkins, B. Ferris, A. Borning, G. S. Rutherford y D. Layton, < Where Is My Bus? Impact of 4mobile real-time information on the perceived and actual wait time of transit riders,> *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 45, n.o 8, págs. 839-848, oct. de 2011. DOI: 10.1016/j.tra.2011.06.010.

Avances en la robótica e inteligencia artificial

Estimación de múltiples puntos de contacto y la proporción de fuerza aplicada para verificación de actividades manipulativas realizadas con el cuerpo completo del robot humanoide

Estimation of multiple contact points and the proportion of applied force for verification of manipulative activities performed with the full body of the humanoid robot

Fabricio Jesús Solano Rojas
Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: fabricio.solanorojas@ucr.ac.cr
0009-0003-9665-6126

Federico Ruiz Ugalde
Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR
e-mail: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr
0000-0001-8563-4341

Palabras clave:

Escape de luz, plataforma móvil, puntos de contacto, referencia verdadera para validación, reflexión interna total frustrada.

Keywords:

Contact points, frustrated total internal reflection, light leak, moving platform, true reference for validation.

RESUMEN

En este proyecto se diseña y construye un sensor tipo panel, que permite detectar múltiples puntos de contacto a lo largo del panel, como su posición, ya que con esto se pretende obtener un “ground truth” (referencia verdadera para validación), el cual es necesario para el desarrollo y la construcción de una plataforma móvil que se encuentra desarrollando el laboratorio ARCOS-Lab. Para realizar este sensor de detección de puntos de contacto, se utiliza la técnica óptica de Reflexión Interna Total Frustrada, la cual permite obtener un sensor de bajo costo con buena eficiencia.

ABSTRACT

In this project, a panel-type sensor is designed and built, which allows the detection of multiple contact points along the panel, as well as its position, since this is intended to obtain a “ground truth” (true reference for validation), which is necessary for the development and construction of a mobile platform that the ARCOS-Lab laboratory is developing. To create this contact point detection sensor, the Frustrated Total Internal Reflection optical technique is used, which allows obtaining a low-cost sensor with good efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

Los robots colaborativos con plataformas móviles típicamente se encuentran en entornos donde son susceptibles a colisiones con los objetos y personas que se encuentren a su alrededor. Dado que estos robots se deben movilizar para realizar sus tareas, en estos ambientes las colisiones serán inevitables, por lo que es necesario implementar mecanismos de control en la plataforma móviles de los robots, que permitan un ambiente seguro cuando se presentan colisiones.

Los ambientes donde este tipo de robots colaborativos serán utilizados, se caracterizan por ser pocos controlados o controlables. Sin embargo, queremos aun así mantener una máxima seguridad para las personas y los objetos en estos ambientes. Los robots industriales son inherentemente inseguros, les es difícil discernir entre personas u objetos delicados o no (o imposible dependiendo del robot). Por esta razón hay dos tendencias o mecanismos en que se le puede agregar seguridad a los robots: 1) dotándolos de control suave, 2) dotándolos de muy elevadas y confiables capacidades de percepción. El problema con la segunda tendencia es que el problema de percepción es muy abierto: existen muchos detalles en la realidad que deben ser entendidos completamente para asegurar que un robot siempre detectará las cosas correctamente y así poder reaccionar/interactuar correctamente con cada una. Por eso es preferible siempre tener robots con algún tipo de seguridad intrínseca en su cuerpo, la forma más versátil es mediante la utilización de control suave.

Actualmente existen diferentes implementaciones de control suave en brazos de los robots colaborativos, el cual los hace seguros con el ambiente, pero existen implementaciones muy limitadas de control suave en las plataformas móviles. Típicamente estos se implementan por medio de sensores de proximidad ópticos, pero no son muy seguros ya que algunas veces fallan al detectar objetos u obstáculos (brillantes o muy opacos) en el camino.

El laboratorio ARCOS-Lab de la Universidad de Costa Rica se encuentra desarrollando una plataforma móvil con capacidades avanzadas de manipulación suave. Para el desarrollo de la plataforma es necesario contar con “ground truth” (referencia verdadera para validación) que permita corroborar e inclusive calibrar las fuerzas y los puntos de contacto que la plataforma estará experimentando. Para obtener este “ground truth”, se pretende diseñar y construir un sensor tipo panel que permita detectar múltiples puntos de contacto sobre una superficie plana y la fuerza equivalente e individual producida por estos. Por lo tanto, este proyecto está dividido en dos partes: la primera corresponde al diseño y construcción del sensor, y la detección de los puntos de contacto, la segunda parte corresponde a la medición de las fuerzas de los puntos de contacto. Este artículo abarca la primera parte del proyecto, ya que en este se desarrolla el hardware del sensor y el software que permita detectar múltiples puntos de contacto y su ubicación en el panel.

A. Planteamiento del problema

El escenario donde queremos utilizar robots móviles, puesto que es compartido con humanos, requiere de la utilización de robots seguros con los humanos y los objetos a su alrededor.

El desarrollo de este tipo de plataformas móviles con características de seguridad e interacción de fuerzas delicadas ha sido muy limitado hasta el momento [1], [2], [3], [4], [5]. Con problemas que varían entre:

- Mucho ruido en la estimación de fuerzas externas.
- Ensamblajes mecánicos que introducen retardos o filtrado de la señal severos que no permitirían ver impactos y reaccionar rápido.
- Montajes poco prácticos para la utilización con un robot humanoide encima.
- Limitada capacidad para detectar/estimar el punto de contacto, o aún más difícil: detectar múltiples puntos de contacto.

Para desarrollar una plataforma así, el ARCOS-Lab dispone de algunas ideas (mezcla de sensores y software novedoso) para resolver muchos de estos problemas. Para esto el laboratorio requiere de la disposición de un sensor de fuerza que permite estimar no solo la magnitud, sino la posición de múltiples fuerzas en diferentes puntos de contacto. Puesto que las colisiones o contactos que se realizarán con el ambiente serán típicamente contra superficies (muebles o paredes) en esta primera etapa de investigación, el laboratorio requiere de un sensor en formato panel.

En el mercado existen múltiples soluciones de sensores de fuerza de múltiples grados de libertad. Sin embargo, estas soluciones presentan las siguientes limitaciones:

- Son muy costosas. Un sensor de 6 grados de libertad puede costar desde \$10000 en adelante.
- Se requiere, de al menos, la conexión de múltiples de estos sensores para estimar múltiples puntos de contacto.
- Posiblemente se requiere de un sensor táctil para este tipo de aplicación.

Este tipo de integración no la hemos observado como un producto terminado comercial. Además, el costo mencionado es una limitación para el laboratorio. Por lo tanto, nuestro interés consiste en desarrollar un sensor tipo panel, que permite estimar múltiples fuerzas y sus posiciones de contacto a bajo costo y con una exactitud adecuada para ser utilizado como la verdad de referencia para validar las capacidades de manipulación suave de una plataforma móvil omnidireccional.

II. METODOLOGÍA

A. Hardware

Las medidas del sensor se obtienen a partir de un lado de la plataforma móvil del ARCOS-Lab, debido a que ahí este será instalado.

Existen diferentes tecnologías de detección táctil, como en el caso de la resistiva, capacitiva y óptica. La tecnología resistiva típicamente su estructura la conforma dos capas conductoras, las cuales se encuentran separadas mediante puntos espaciadores aislantes. Al aplicar una señal de corriente a una de las capas y cuando se presenta un contacto por parte de un usuario en la superficie

del panel con cierto nivel de fuerza de manera que la capa superior se deforma provocando el contacto entre ambas capas, por lo que la señal de corriente aplicada a una de las capas puede fluir a la otra capa, a partir de este cambio en la señal de corriente se puede determinar la ubicación de contacto ubicado [6].

Los paneles táctiles con tecnología capacitiva proyectada se encargan de medir el cambio de capacitancia entre electrodos para la detección de los puntos de contacto. Cuando un dedo humano o un lápiz óptico toca el panel, se afecta el campo eléctrico, ocasionado un cambio en la capacitancia, esto se detecta por medio de los electrodos, donde se envía una señal al procesador, el cual se encargará de determinar la ubicación de contacto [6].

Por último, la tecnología óptica se encuentra conformada típicamente por LEDs y cámaras, en dónde por medio de procesar las imágenes obtenidas a partir de la/las cámaras se obtienen la ubicación de los puntos de contacto en el panel [6].

Dado que con este proyecto se pretende contribuir con el “ground truth”, no solamente se busca la detección de múltiples puntos de contactos, sino también la obtención de la fuerza equivalente e individual producida por estos. Por lo tanto, un punto importante corresponde en obtener el área de la huella producida por el contacto, debido a que con ello se puede obtener la proporción de la fuerza de contacto, es decir entre más área mayor es la fuerza de contacto producida y con este parámetro se puede obtener la fuerza individual producida por cada contacto, ya que en la segunda parte de proyecto se utilizarán celdas de carga para obtener la fuerza total producida por los puntos de contacto, entonces por medio de la proporción de la fuerza y la fuerza total se puede obtener la fuerza individual de cada punto de contacto. Este cálculo del área no es posible de conseguir por medio de las tecnología resistiva y capacitiva. Entonces, se llegó a la conclusión que utilizar una tecnología óptica es más viable para este proyecto, debido a que por medio de procesamiento de imágenes se puede obtener este requisito. Por lo que se utiliza la técnica de reflexión interna total frustrada (FTIR por sus siglas en inglés). La arquitectura de esta técnica, la conforman una tira de LEDs que se encuentran alrededor de la superficie de un panel de acrílico como se muestra en la Fig. 1. La luz emitida por los LEDs experimenta una reflexión interna total, es decir la luz no escapa de la capa del acrílico, esto se debe a que la luz encuentra una interfaz con un medio con un índice de refracción más bajo, por ejemplo, el acrílico al aire, por lo que la luz se refracta en una extensión, la cual depende de su ángulo de incidencia. Cuando se presenta un contacto en el panel por parte del dedo de un usuario o con algún material, frustra esta reflexión interna total provocando que se presenta un escape de luz (luz difusa) en la posición de contacto, la cual es detectada por una cámara que se encuentra debajo de la superficie del panel, por lo tanto, por medio de la cámara y realizando procesamiento de imágenes se obtiene la ubicación de contacto [6], [7].

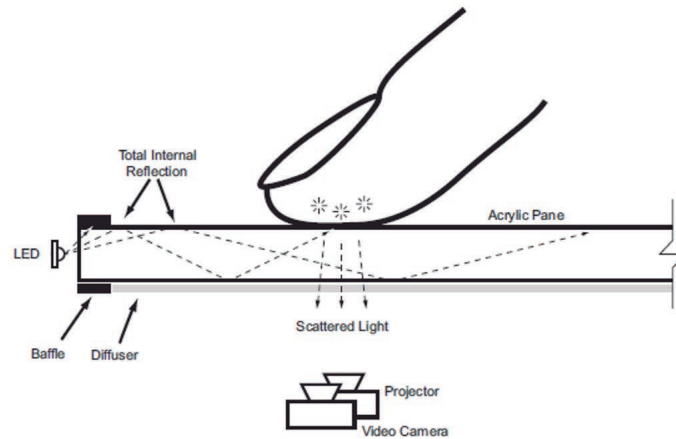


Fig. 1. Técnica de reflexión interna total frustrada [6]

Una de las desventajas de la técnica FTIR es entre más grande sea el panel la cámara debe colocarse más alejado de este para que la captura del panel por parte de la cámara sea en su totalidad, por lo que el volumen del sensor aumentará y por ende aumentará el costo de los materiales. Sin embargo, para contrarrestar este problema se utilizó un lente gran angular consiguiendo un ángulo de visión mayor, por lo tanto, permite disminuir la distancia entre la cámara y el panel.

La estructura que da soporte al panel está conformada por perfiles de aluminio. Para unir esta estructura con el panel se utilizan cuatro celdas de carga, las cuales se colocan en las cuatro esquinas de la estructura de perfiles de aluminio para que se unan con las cuatro esquinas del panel de acrílico. Estas celdas de carga no solamente dan la función de unir la estructura y el panel, sino que en estas ubicaciones permiten detectar la fuerza equivalente e individual cuando se presenten puntos de contacto a lo largo del panel.

B. Software

El software se desarrolló utilizando un Raspberry pi 4 y por medio del lenguaje de programación Python. Debido a que se busca detectar puntos de contacto con el panel a través de una cámara, se utiliza la librería OpenCV para procesar las imágenes obtenidas por medio de la cámara.

Sin embargo, antes de procesar las imágenes para encontrar los puntos de contacto, se debe considerar que los lentes gran angular distorsionan la imagen como se muestra en la Fig. 2, lo que podría llegar a afectar los valores reales de la ubicación de los puntos de contacto. Por lo tanto, para corregir el efecto provocado por este tipo de lentes, se debe inicialmente calibrar la cámara y a partir de los datos obtenidos de la calibración y utilizando funciones de la librería OpenCV se puede lograr eliminar este efecto.



Fig. 2. Imagen distorsionada al utilizar lente gran angular

Una vez obtenidas las imágenes de la cámara sin distorsión, se busca que a partir del escape de luz provocado por contactos en el panel se obtenga la ubicación de estos, para ello se procede aplicarles diferentes filtros, por ejemplo sustracción de una imagen de referencia a las demás imágenes para eliminar posibles luces externas que podrían provocar puntos de contacto falsos cuando se procesen las imágenes, así como también convertir las imágenes a escala de grises debido a que el método que vamos a utilizar para encontrar los puntos de contacto es a partir de los contornos generados por este escape de luz. Una vez encontrados los contornos, se obtienen los momentos de imagen, los cuales vienen dados por medio de la ecuación (1). En donde x y y corresponden a las coordenadas de un píxel y la función $I(x,y)$ es su intensidad. Cabe destacar que el momento M_{00} corresponde al área del contorno [8].

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x,y) \quad (1)$$

Para encontrar la ubicación de los puntos de contacto, se obtienen a partir de los centroides de cada contorno, para ello se debe primero calcular los momentos M_{00} , M_{10} y M_{01} como se muestra en la ecuación (2).

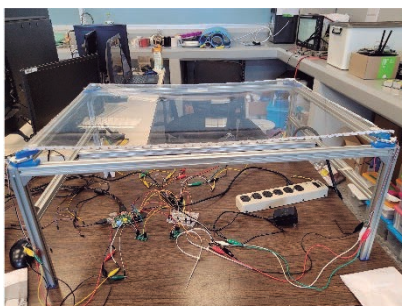
$$(X,Y) = \left(\frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right) \quad (2)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

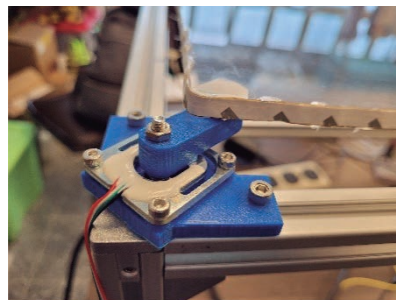
A. Hardware

Para unir la estructura de perfiles de aluminio con el panel de acrílico por medio de las celdas de carga, se tuvieron que diseñar algunas piezas e imprimirlas con una impresora 3D para que fuera posible esta unión como se muestra en la Fig. 3, debido a que cuando se presenta contactos

en el panel las celdas de carga se deforman y esta deformación se transcribe a valores de fuerza, entonces la idea es que por medio de estas piezas permitan que cuando exista una deformación, no se presenten contactos de la celda de carga con la estructura o el panel de manera que afecte la medición final de las fuerzas.



(a) Vista completa del sensor
Fig. 3. Estructura del sensor



(b) Unión de la estructura y el acrílico

Uno de los principales problemas a considerar, como se mencionó se busca un sensor que permita detectar la posición de contacto cuando se presentan sobre el panel, sin embargo, existen muchos objetos que por su material no generan el escape de luz cuando se presenta un contacto de estos con el panel, por ejemplo, la esquina de una mesa de madera. Por lo tanto, al no presentarse el escape de luz la cámara será incapaz de detectar el punto de contacto. Para solucionar este problema se buscó un material tipo foam que permitiera cubrir el panel de acrílico de manera que si se presentara un contacto con cualquier objeto o persona tocara primero el foam y luego este el acrílico. No obstante, para evitar posibles puntos falsos se diseñaron unas piezas e imprimieron con la impresora 3D de modo que el foam y el acrílico estuvieran separados unos 3 cm aproximadamente como se muestra en la Fig. 4.

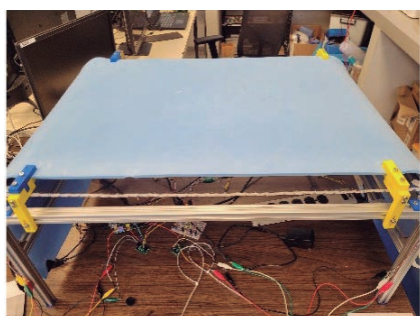


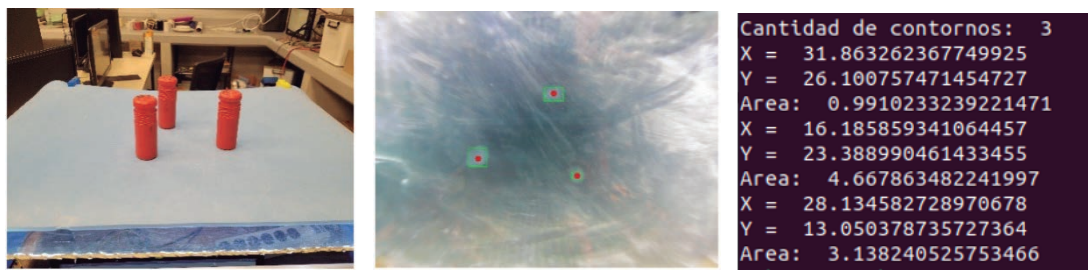
Fig. 4. Estructura que separa el panel de foam



B. Software

Como se mencionó en la sección anterior, cada imagen que se obtiene por medio de la cámara es procesada para encontrar las ubicaciones de los puntos de contacto, por lo tanto, se realizaron diferentes pruebas a lo largo del panel de acrílico. No obstante, se deben de tener ciertas

consideraciones como en el caso de rayas o mucha suciedad en el acrílico que pueden provocar puntos falsos, a pesar de que esto se puede eliminar por medio de la sustracción de imágenes se deben de manejar debido a que si se presentan puntos de contacto en estas áreas podrían no ser detectados. Sin embargo, al considerar estos aspectos presenta una alta precisión al encontrar la posición de los puntos de contacto. Por ejemplo, en la Fig. 5 se muestra una prueba que se realizó con tres objetos que se colocaron en el panel, en donde en la Fig. 5b se puede observar la detección de estos objetos, en el cual con un cuadro verde encierra cada contorno generado por los objetos y un punto rojo su centroide. Además, en la Fig. 5c se muestra los datos obtenidos y se puede observar que se detecta 3 puntos de contacto o contornos, la posición por medio de los ejes X y Y, y su área en centímetros, en donde se puede observar que su área varía, principalmente el tercer contacto respecto a los otros dos, esto se debe a que el tercer objeto (posicionado más a la derecha) presenta un peso menor en comparación a los otros. Cabe resaltar, que los valores obtenidos por medio del software se encuentran en píxeles, sin embargo, se deben calibrar para obtenerlos en centímetros.



(a) Objetos sobre el panel (b) Detección de los tres contornos (c) Datos obtenidos
Fig. 5. Prueba con tres objetos colocados en el panel del sensor

CONCLUSIONES

1. Se diseñó y desarrolló un sensor tipo panel que permite detectar múltiples puntos de contacto, el cual contribuirá al “ground truth” que es necesario para el desarrollo de la plataforma móvil del ARCOS-Lab.
2. Se logró implementar la tecnología óptica de FTIR, de manera que no solamente puede detectar los puntos de contacto, sino que puede detectar el área generada por la huella, la cual es necesaria para la obtención de la fuerza individual de los puntos de contacto sobre el panel.
3. Se recomienda evitar las rayas o mucha suciedad en el panel de acrílico para que no se generen puntos falsos que pueden afectar la detección verdadera de los puntos de contacto sobre el panel.
4. Se implementó una estructura utilizando un foam sobre el panel de acrílico de forma que permita que cuando se generen puntos de contacto por cualquier objeto o persona estos generen un escape de luz y por lo tanto sean detectados por medio de la cámara.

AGRADECIMIENTOS

Quiero Agradecer al laboratorio ARCOS-Lab por darme la oportunidad de ser parte de este proyecto. Además, a la Universidad de Costa Rica y la Escuela de Ingeniería Eléctrica por brindar el material y equipo necesario para el desarrollo del mismo.

REFERENCIAS

- [1] T. Tsuji, «Impedance control of mobile robot with shell-shaped force sensor,» en *2009 IEEE International Conference on Mechatronics*, 2009, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ICMECH.2009.4957162.
- [2] M. Kollmitz, D. Büscher, T. Schubert y W. Burgard, «Whole-Body Sensory Concept for Compliant Mobile Robots,» en *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, págs. 5429-5435. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460510.
- [3] K. S. Kim, T. Llado y L. Sentis, «Full-body collision detection and reaction with omnidirectional mobile platforms: a step towards safe human–robot interaction,» *Autonomous Robots*, vol. 40, págs. 325-341, 2016. DOI: 10.1007/s10514-015-9464-x.
- [4] M. Iskandar, G. Quere, A. Hagengruber, A. Dietrich y J. Vogel, «Employing Whole-Body Control in Assistive Robotics,» en *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, págs. 5643-5650. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967772.
- [5] K. Bussmann, A. Dietrich y C. Ott, «Whole-Body Impedance Control for a Planetary Rover with Robotic Arm: Theory, Control Design, and Experimental Validation,» en *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, págs. 910-917. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460533.
- [6] S. Gao, S. Yan, H. Zhao y A. Nathan, *Touch-Based Human-Machine Interaction: Principles and Applications*. ene. de 2021, ISBN: 978-3-030-68947-6. DOI: 10.1007/978-3-030-68948-3.
- [7] J. Y. Han, «Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection,» en *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ép. UIST '05, Seattle, WA, USA: Association for Computing Machinery, 2005, págs. 115-118, ISBN: 1595932712. DOI: 10.1145/1095034. 1095054. dirección: <https://doi.org/10.1145/1095034.1095054>.
- [8] K. Bhima y A. Jagan, «Analysis of moment algorithms for blurred images,» en *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2016, págs. 2350-2356. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566562.

Adaptación de una máquina de control numérico computarizado (CNC) para su uso como estación de traslación automatizada

Adaptation of a computer numerical control (CNC) machine for use as an automated translation stage

Josué Ricardo Zúñiga Jiménez

Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica, UCR

e-mail: josue.zunigajimenez@ucr.ac.cr

Diego Dumani Jarquín

Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica, UCR

e-mail: diego.dumani@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Adaptación de hardware, estación de traslación, CNC, GRBL, control numérico computarizado, transductor ultrasónico.

Keywords:

Hardware adaptation, translation stage, CNC, GRBL, computer numerical control, ultrasonic transducer.

RESUMEN

Este trabajo se centró en la implementación y adaptación de una máquina de control numérico computarizado (CNC) para funcionar como una estación de traslación automatizada para un transductor ultrasónico. Se realizaron análisis exhaustivos de procesos, identificación de áreas de mejora y selección de tecnologías adecuadas. Se adaptó el ensamblaje de la máquina y se mejoró su funcionalidad mediante la automatización y la integración de códigos GRBL para CNC. Se diseñó un prototipo para la adaptación del transductor y se desarrolló un software amigable mediante MATLAB. Las adaptaciones incluyeron funciones de seguridad para el sistema y el usuario, y se culminó con una guía de uso para el usuario. Como parte del proyecto, se pudo implementar satisfactoriamente la función de traslación automatizada, lo que brindará herramientas para distintos usos y proyectos de investigación, incluyendo la adquisición de imágenes en tres dimensiones a partir de sensores lineales unidimensionales.

ABSTRACT

This work focused on the implementation and adaptation of a computer numerical control (CNC) machine to function as an automated translation stage for an ultrasonic transducer. Exhaustive process analyzes were carried out, identification of areas for improvement and selection of appropriate technologies. The machine assembly was adapted, and its functionality was improved through automation and integration of GRBL codes for CNC. A prototype was designed to adapt the transducer and user-friendly software was developed using MATLAB. Adaptations included system and user safety features, culminating in a user guide. As part

of the project, the automated translation function was successfully implemented, which will provide tools for different uses and research projects, including the acquisition of three-dimensional images from one-dimensional linear sensors.

I. INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica de la Universidad de Costa Rica se cuenta con sistemas de adquisición de datos e imágenes médicas. Entre estos se pueden destacar los sistemas de ultrasonido, cuyas sondas cuentan con un arreglo unidimensional de 128 sensores, capaces de adquirir y reconstruir imágenes bidimensionales. A pesar de la existencia comercial de sensores bidimensionales, que permitirían la adquisición de imágenes tridimensionales, dichos componentes pueden llegar a ser muy costosos, además de requerir mejoras en el hardware de adquisición [1,2].

Por otro lado, existe la opción de utilizar un arreglo unidimensional de sensores y trasladarlo en pasos controlados, para adquirir diferentes “rodajas” o “slices”, que consisten en imágenes bidimensionales de un tejido o muestra que luego pueden ser apiladas y renderizadas por medio de software para obtener una imagen tridimensional [3]. Sin embargo, esto requiere de estaciones de traslación que pueden ser muy costosas, o bien, no siempre cuentan con la flexibilidad para ser integradas con otros sistemas a través de software personalizado.

Por tanto, se requiere de una solución de bajo costo que permita trasladar un sensor ultrasónico en forma lineal y controlada, así como integrar esta solución con equipos de adquisición de datos por medio de software.

En este trabajo, se propone llegar a esta solución con el uso de una máquina de control numérico computarizado (CNC) de código abierto, que permita trasladar el transductor según las necesidades de cada experimento, y a la vez pueda controlarse a través de MATLAB, para poder integrarse con otros equipos plataformas que utilizan dicha plataforma.

Las CNCs permiten controlar la posición de un elemento móvil a lo largo de tres ejes dimensionales. De esta forma, son utilizadas en aplicaciones como impresión 3D, corte láser, fresado, entre otras [4]. Este tipo de máquinas se suelen controlar por medio de código G. Un analizador sintáctico (parser) del código G es el software Grbl, el cual es un controlador de código abierto, escrito en C de forma optimizada para correr en plataformas Arduino a través del puerto paralelo [5].

El presente proyecto aborda la integración de una máquina CNC con un transductor ultrasónico para la adquisición de señales e imágenes biomédicas en tres dimensiones. Este enfoque multidisciplinario no solo fortalece la capacidad investigativa del laboratorio, sino que también sirve como un ejemplo de colaboración interdisciplinaria y resolución de problemas en la industria biomédica.

II. MÉTODOS

A. Materiales

En el proyecto se utilizó una máquina CNC 3018 (Sagaon Tech), la cual cuenta con un eje lineal de 10 mm de diámetro, tornillo de acero inoxidable de 8 mm, motor paso a paso de 3 piezas, bifásico NEMA 17 (1.3A 0.25Nm). La CNC cuenta además con un motor del eje 755 (12-36V) 24V-7000rpm. Una tabla con perfil 15180 (huella de 260x180mm), fuente de alimentación de 24 V y 5.6 A, controlada por medio de Arduino a través de software Grbl.

La CNC 3018 incluye un software para su uso (Fig. 1). sin embargo, este software sufría limitaciones al no poder ser integrado con MATLAB y otros equipos externos, para el control sincronizado de posiciones.

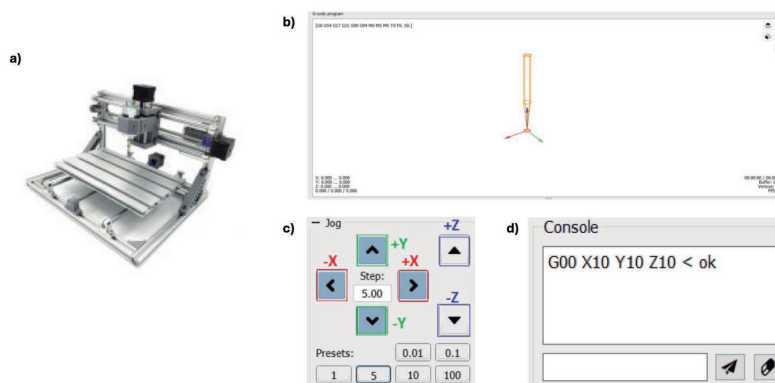


Fig. 1. a) Ilustración de la CNC 3018, y capturas del software incluido, el cual permite: b) visualización de la posición del eje, c) control manual por pasos, y d) control manual o secuencial por medio de código G

B. Proceso de optimización y adaptación

El proceso de optimización y adaptación de la máquina CNC 3018 al transductor ultrasónico se llevó a cabo mediante varias etapas, comenzando con un análisis exhaustivo de los procesos existentes en el laboratorio de investigación, donde se identificaron áreas de mejora, incluyendo una problemática con el ensamblaje del traductor ultrasónico. Previo a este proyecto, el transductor contaba con una estación mecánica manual, lo cual imposibilita la adquisición de imágenes de forma repetible y automatizada, limitando así la funcionalidad del transductor ultrasónico.

Tras el análisis de las áreas de mejora, se identificó a la máquina CNC 3018 como una opción factible para implementar una estación de traslación automática de código abierto. Al ser la CNC 3018 una máquina normalmente utilizada en la industria mecánica, esta permite el uso de comandos de tipo Grbl, los cuales dan el movimiento a la máquina en los ejes x, y, z.

C. Diseño de software

Para el diseño de software se identificó que los comandos Grbl, propios de una máquina CNC, se pueden usar de manera adaptada para mejorar y personalizar el funcionamiento de la máquina. Se identificaron los comandos que pueden mover la maquina CNC a ciertas velocidades, ya sean altas o bajas para ampliar el rango de posibilidades de uso. Luego se utilizó MATLAB para desarrollar un software personalizado que incluyera una interfaz gráfica (GUI) y permitiera la operación eficiente de la máquina adaptada, teniendo en cuenta las especificidades del equipo del laboratorio y tipos de mediciones a realizar.

D. Diseño de hardware

El diseño del hardware es algo vital para el correcto funcionamiento de la unión del transductor ultrasónico con la CNC, ya que dicha maquina no tiene como objetivo inicial el acople de un transductor ultrasónico a su eje. Para asegurar la correcta estabilidad y sostén del transductor ultrasónico, se realizaron cambios en el tamaño de la máquina sustituyendo los perfiles de aluminio para aumentar su altura, de esta forma evitando el choque del transductor con la base, así como la adquisición de imágenes en muestras de distintas alturas. Asimismo, se diseñó un soporte tridimensional para asegurar el correcto asentamiento del transductor en la CNC. Este soporte constó de una pieza impresa en 3D para ensamblarse y dar la funcionalidad esperada a la CNC junto con el transductor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Hardware

Para la creación de la adaptación de hardware se necesitó fabricar una pieza adicional y adaptar el tamaño de la máquina a través de herramientas que originalmente no están diseñadas para esta adaptación. La figura 2 muestra la pieza diseñada para impresión 3D, así como los cambios de altura realizados a la máquina.

Para la creación de la adaptación de hardware se necesitó fabricar una pieza adicional y adaptar el tamaño de la máquina a través de herramientas que originalmente no están diseñadas para esta adaptación. La figura 2 muestra la pieza diseñada para impresión 3D, así como los cambios de altura realizados a la máquina.

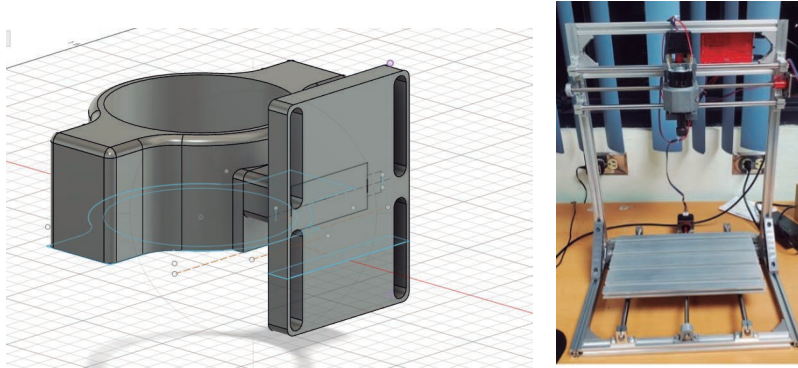


Fig. 2. Adaptación de hardware realizada en la CNC muestra a) soporte diseñado para impresión 3D y b) modificación de la altura de los ejes mediante la sustitución de perfiles de aluminio

B. Software

El software creado para la adaptación de la CNC debió crearse desde cero, para evitar arrastrar funciones innecesarias y procurar una operación óptima y personalizada para la operación de toma de imágenes tridimensionales. Se logró satisfactoriamente ejecutar comandos de Grbl a través de MATLAB, con la interfaz de usuario haciendo un entorno amable con el usuario, y permitiendo la funcionabilidad de los comandos en la CNC (Fig. 3.) Para la creación del software se buscó la manera más adecuada para obtener la adaptación y funcionabilidad requerida para la máquina. Es así como mediante el proceso de creación del software se comprobó que el requisito más crítico constaba en poder controlar las distancias de los desplazamientos, así como la duración en microsegundos de cada desplazamiento, sin necesidad de utilizar los comandos Grbl. Aunque el uso de Grbl es funcional, puede no ser intuitivo para el usuario final. Por tanto, se creó una GUI con botones de desplazamiento rápido y desplazamiento lento, en los cuales se especifica la distancia a trasladar, y se activa manualmente por el usuario (Fig. 4).

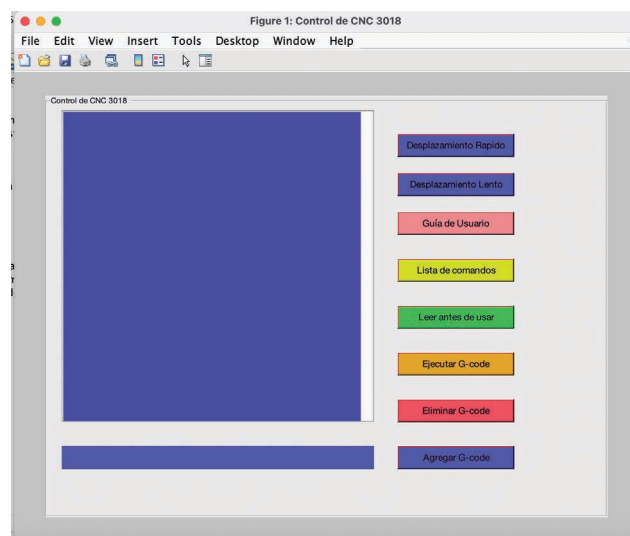


Fig. 3. Software y GUI creados en MATLAB para mover la CN

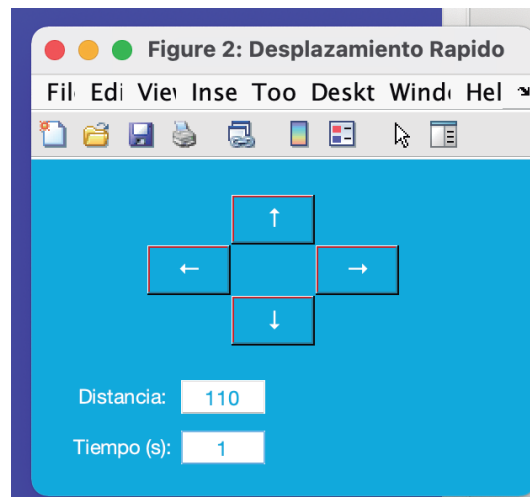


Fig. 4. Desplazamiento rápido creado en el software y GUI

La principal contribución de este proyecto consiste en permitir al usuario desarrollador diseñar las capacidades que el usuario final requiera, sin estar restringido por las limitaciones del software y hardware original (Fig. 1). A través de la adaptación en MATLAB, el sistema adaptado puede interactuar con otros equipos, entre ellos el sistema de adquisición de imágenes ultrasónicas, cuyos scripts son basados en MATLAB. Esto último consiste un objetivo futuro que se desarrollará como continuación de este trabajo.

CONCLUSIONES

El proyecto de adaptación y optimización de la máquina CNC 3018 al transductor ultrasónico ofreció mejoras significativas en la eficiencia operativa y la funcionalidad del equipo en el laboratorio.

La integración de tecnologías avanzadas como la CNC y el transductor ultrasónico representa un permite realizar procedimientos y experimentos con mayor precisión y repetibilidad. Asimismo, se puede realizar escaneos de forma automatizada por lo que facilita las tareas de investigación del usuario final.

El software desarrollado proporciona una interfaz amigable que facilita su uso por parte de usuarios sin experiencia previa en CNC, lo que amplía su accesibilidad y utilidad en el laboratorio.

En resumen, la adaptación de la máquina CNC al transductor ultrasónico representa un avance significativo en la optimización de equipos para aplicaciones biomédicas. Este proyecto sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en el laboratorio, lo cual incluye la integración de la máquina con distintos equipos de adquisición de datos basados en MATLAB.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica bajo los proyectos C0232 y C1464.

REFERENCIAS

- [1] J. Woo and Y. Roh, “Ultrasonic 2D matrix array transducer for volumetric imaging in real time,” 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Dresden, Germany, 2012, pp. 1568-1571, doi: 10.1109/ULTSYM.2012.0392
- [2] M. Bernal, B. Cunitz, D. Rohrbach, and R. Daigle, “High-frame-rate volume imaging using sparse-random-aperture compounding,” *Physics in Medicine & Biology*, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab9372>.
- [3] D. S. Dumani, I.-C. Sun, and S. Y. Emelianov, “Ultrasound-guided Immunofunctional Photoacoustic Imaging for Diagnosis of Lymph Node Metastases,” *Nanoscale*, vol. 11, no. 24, pp. 11649–11659, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1039/c9nr02920f>.
- [4] G. de J. C. Escudero, C. B. Alvarez, A. Z. López, C. A. Cruz, and A. F. Ramírez, “Diseño de una cnc de corte láser de 3 ejes controlado por arduino con una interfaz programada en python,” *Pistas Educativas*, vol. 44, no. 144, Mar. 2023, [En línea]. Disponible en: <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2958>
- [5] “Home · gnea/grbl Wiki,” *GitHub*. <https://github.com/gnea/grbl/wiki>

Transformers Unidos: Eficacia De los Modelos Ensemble-ViT en Clasificación Automática de Flora Costarricense

Transformers United: Effectiveness of Ensemble-ViT Models in Automatic Classification of Costa Rican Flora

Anthony Adrián Badilla Olivas

Estudiante de Computación con énfasis en Ciencias de la Computación, UCR

e-mail: anthony.badilla@ucr.ac.cr

Enrique Guillermo Vilchez Lizano

Estudiante de Computación con énfasis en Ciencias de la Computación, UCR

e-mail: enrique.vilchezlizano@ucr.ac.cr

Rubén González Villanueva

Docente de la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, UCR

e-mail: ruben.gonzalezvillanueva@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Clasificación de plantas, Aprendizaje Automático Profundo, Visión por Computadora.

Keywords:

Plant Classification, Deep Machine Learning, Computer Vision.

RESUMEN

En clasificación automática de flora, es común enfrentarse a conjuntos de datos no balanceados. El artículo explora la efectividad de los modelos de ensemble de Transformers de Visión en comparación a un modelo de ensemble con redes convolucionales para el reconocimiento de flora de Costa Rica. Se observan tendencias prometedoras en esta tarea incluso especies en peligro que poseen pocas muestras. El potencial de estas debe estudiarse más a fondo para determinar si nuestras conclusiones pueden extrapolarse a otros conjuntos de datos no balanceados. El código de los experimentos está disponible en https://github.com/Antonio-Tresol/vits_ensemble_cr_leaves.

ABSTRACT

In automatic flora classification, it is common to face unbalanced data sets. The article explores the effectiveness of Vision Transformers ensemble models in comparison to an ensemble model with convolutional networks for the recognition of Costa Rican flora. Promising trends are observed in this task, including endangered species that have few samples. The potential of these should be studied further to determine whether our conclusions can be extrapolated to other unbalanced data sets. The code of the experiments is available at https://github.com/Antonio-Tresol/vits_ensemble_cr_leaves.

I. INTRODUCCIÓN

La clasificación de plantas es crucial para la conservación de la biodiversidad ante peligros ambientales [1]. El uso de técnicas avanzadas de clasificación de datos desequilibrados ha sido clave para optimizar la gestión de recursos y desarrollar modelos predictivos que ayuden en la protección de la flora en su entorno. Los sistemas de reconocimiento automático han ganado popularidad al reducir costos y permitir la participación de personas no profesionales en esta tarea, así como reducir el error humano [2]. Esto es posible a través de aplicaciones informáticas que permiten recopilar datos, como fotografías tomadas incluso desde teléfonos celulares [3]. En este contexto, el artículo compara la eficacia de modelos de clasificación automática basados en redes convolucionales y Transformers de visión, destacando la importancia de la innovación tecnológica en la conservación de la biodiversidad.

Este trabajo sigue la línea de [4], quienes encontraron viable el uso de modelos ensemble de redes convolucionales para clasificación multiclase de plantas con conjuntos de datos no balanceados, específicamente en el conjunto de datos CR Leaves [1]. Se pretende explorar los Transformers de visión, los cuales han demostrado mejores resultados que los modelos convolucionales en tareas de clasificación [5], [6], [7]. Concretamente, modelos Transformers de visión ensemble.

A. Trabajo relacionado

Las tareas de clasificación en datos no balanceados han sido ampliamente estudiadas, con enfoques como el sobremuestreo y submuestreo [8], [9], [10], así como modelos de ensemble [4], [11]. En clasificación de plantas, se han utilizado redes convolucionales profundas [12], Transformers de visión [3] e incluso ensembles de ambos [13]. Modelos ensemble basados en Transformers de visión se han explorado en otras tareas de clasificación [14], [15], pero no parecen haber sido suficientemente estudiados para clasificación de plantas en datos no balanceados, considerando métricas y técnicas apropiadas para estos problemas, así como parámetros preentrenados congelados.

II. METODOLOGÍA

El experimento trabaja sobre el conjunto de datos llamado CR Leaves [1]. Este contiene imágenes de hojas de plantas endémicas de Costa Rica, ordinarias y en peligro, cada una categorizada con su respectivo nombre científico, que suman un total de 254 especies y 3813 especímenes. Como es de esperarse, aquellas especies en riesgo tienen menos muestras.

A. Modelos

Se evaluará la eficacia de dos **modelos ensemble** para el reconocimiento de plantas: E-Triple [4] conformado por redes convolucionales y Ensemble ViT por Transformers de visión. Ambos combinan las salidas de modelos mediante votación suave [13], y adaptan la última capa para la tarea específica mediante transferencia de aprendizaje [16]. El ensemble E-Triple combina ResNet50 [17], EfficientNetB4 [18] y ConvNext [19], siendo este último también utilizado como modelo individual de referencia. Por otro lado, Ensemble ViT combina ViT-Base-16, ViT-Base-32 y ViT-Large-32

[14] para aprovechar sus fortalezas e intentar mejorar la eficacia en la tarea. ViT-Base-16 [5], que divide la imagen en parches y los procesa con una arquitectura transformer, también se utiliza como modelo individual de referencia.

Para pasar las imágenes a los modelos, se aplicaron transformaciones previas. **Para los modelos convolucionales**, las imágenes se cambiaron a un tamaño de 232x232 píxeles, como en [4], utilizando interpolación bilineal. Se recortaron y se normalizó cada canal de color utilizando los valores específicos de promedios y desviaciones estándar de ImageNet [20]. **Para los modelos transformer de visión**, se redimensionaron a 256x256 píxeles [5], mediante interpolación bilineal. Luego, se recortaron y se normalizaron cada canal de color utilizando los valores de promedios y desviaciones estándar de ImageNet [20], con la excepción de que se le modificó el primer canal de color a un promedio de 0, pues con este se obtuvo mejores resultados, dada exploración preliminar de los modelos ViT.

B. Métricas

Es común medir los modelos con la métrica de exactitud ordinaria, obteniendo una tasa de aciertos de la categoría predicha $\hat{y}$ respecto a la verdadera categoría y :

$$Exactitud(\hat{y}, y) = \frac{1}{N_{muestras}} \sum_{i=1}^{N_{muestras}} (\hat{y}_i == y) \quad (1)$$

No obstante, con datos no balanceados, esta métrica puede dar falsas expectativas del rendimiento [4]. Por ello, **el promedio macro de exactitud es una mejor opción para conjuntos no balanceados**, pues toma todas las predicciones $\hat{y}_c$, (cuya clase verdadera es c) y hace un promedio de la razón de aciertos de cada clase. En ocasiones se le conoce como exactitud balanceada [4].

$$Exactitud\ macro(\hat{y}, y) = \frac{1}{N_{clases}} \sum_{c=1}^{N_{clases}} Exactitud(\hat{y}_c, c) \quad (2)$$

C. Experimentos

Primero, para tomar las mediciones se evaluó el rendimiento de los modelos individuales y los ensembles mediante un entrenamiento individual de cada modelo base durante 30 épocas. Se utilizaron parámetros pre-entrenados en ImageNet 1K y se congelaron todas las capas excepto la de clasificación. Se realizaron 32 réplicas de entrenamiento para cada modelo individual, guardando el mejor checkpoint en cada réplica en función de la mayor exactitud balanceada en el conjunto de validación. Para la evaluación individual de cada modelo no ensemble, se midió la exactitud macro y micro en el conjunto de prueba al final de las 30 épocas de entrenamiento. Luego, se formaron ensembles combinando los modelos individuales. En cada réplica, se seleccionó el checkpoint

correspondiente de cada modelo base y se combinaron para formar un ensemble. Se midió la exactitud macro y micro de cada ensemble en el conjunto de prueba. Por último, **los hiperpárametros del entrenamiento** se escogieron con base a los usados en [4], además de considerar para velocidad de aprendizaje con respecto a hiperpárametros y optimizadores [21], [22]. Se usó una tasa de aprendizaje de 0.0003, con un tamaño de batch de 64, un tamaño de prueba de 50%, ADAM [23] como optimizador, Cosine Annealing [24] para ajustar la tasa de aprendizaje, y *early stopping* con paciencia 3.

Para determinar si hay diferencias significativas en el rendimiento de los modelos, se realizaron las pruebas estadísticas de normalidad (Shapiro-Wilk) y de homogeneidad de varianzas (Levene). En caso de cumplirse los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se realizó un ANOVA para determinar si existían diferencias significativas entre las medias de las exactitudes balanceadas de los ensambles. Si el ANOVA resultaba significativo, se aplicaba la prueba de Tukey HSD para identificar qué pares presentaban diferencias significativas en su rendimiento.

III. RESULTADOS

Los resultados del experimento revelaron diferencias significativas en el rendimiento de los modelos. Para la exactitud básica (no balanceada), los modelos ensemble superaron a los individuales. E-Triple lideró con una media de exactitud de 0.8167, seguido de Ensemble ViT con 0.8079. ViT-Base-16 y ConvNext obtuvieron medias de exactitud de 0.7614 y 0.7465, respectivamente. Las mediciones sobre la exactitud balanceada indicaron la superioridad de los modelos ensemble, con Ensemble ViT logrando la media más alta de 0.7879, seguido de E-Triple con 0.7805. Los modelos individuales, ViT-Base-16 y ConvNext, obtuvieron medias de 0.7392 y 0.7129, respectivamente.

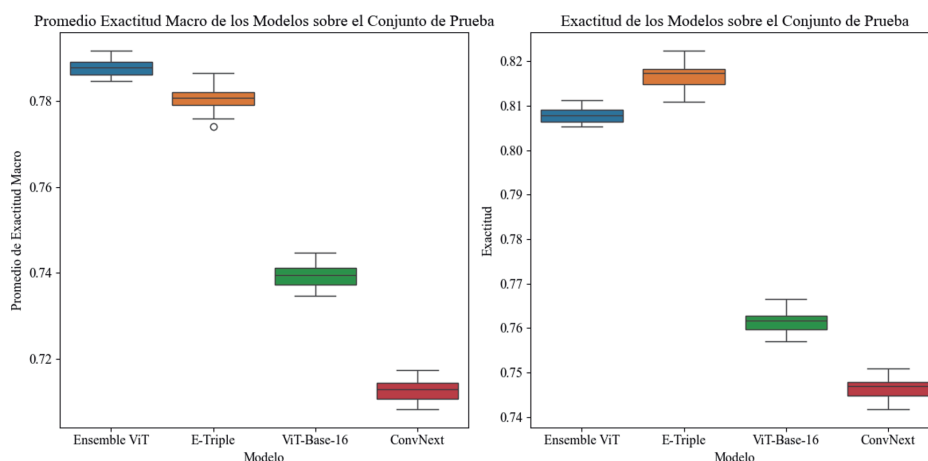


Fig. 1. Comparación de Exactitud y Promedio Exactitud Macro

Las pruebas de normalidad confirmaron que los datos de todos los modelos seguían una distribución normal, pues en ningún caso se rechaza la hipótesis nula (no se da que $p < 0.05$). Además, la prueba de Levene indicó que las varianzas eran iguales entre los grupos. Siendo así, posteriormente

la prueba ANOVA reveló una diferencia significativa entre las medias de exactitud balanceada de los modelos. Para explorar donde se encontraban las diferencias se realizó la prueba de Tukey HSD la cual confirmó que todas las diferencias por pares entre los modelos eran estadísticamente significativas para un valor p ajustado < 0.02 (por las correcciones de valores p explicadas en [25]).

CUADRO I
RESULTADOS DE PRUEBAS ESTADÍSTICAS

	Shapiro - Wilk		Levene		ANOVA	
	Estadístico	Valor P	Estadístico	Valor P	Estadístico	Valor P
E Triple	0.9753	0.6566	0.7421	0.5289	7292.0922	3.24×10^{-139}
ViT Ensemble	0.9689	0.4697				
ViT-Base-16	0.9738	0.6129				
ConvNext	0.9731	0.5899				

En resumen, los modelos ensemble, E-Triple y Ensemble ViT, superaron significativamente a los modelos individuales, ViT-Base-16 y ConvNext, tanto en términos de exactitud básica como de exactitud balanceada en el conjunto de datos. Estos resultados destacan el potencial de los modelos ensemble para mejorar el rendimiento en la clasificación de especies de flora, especialmente cuando se enfrentan a desbalances en los datos.

IV. DISCUSIÓN

Dado que las todas las condiciones requeridas para las pruebas estadísticas de ANOVA y Tukey se cumplieron, los resultados obtenidos en la sección anterior tienen un fuerte grado de validez para el contexto específico en el que se están aplicando. Los resultados tienen implicaciones importantes en la aplicación práctica de modelos de aprendizaje automático en la clasificación de flora, especialmente cuando existen desbalances en los datos. Sugieren que los modelos de ensemble pueden ser una estrategia efectiva para mejorar el rendimiento, lo que podría ser útil en aplicaciones del mundo real.

A partir de este estudio, se pueden validar dos principales ideas. Primeramente, los modelos de ensemble pueden ser más efectivos que los modelos individuales. A pesar del gran rendimiento que los modelos individuales mostraron, los de ensemble superaron con creces sus resultados en la métrica de exactitud macro. Esto muestra el potencial de las estrategias de ensemble en tareas de clasificación de flora con datos no balanceados. Y segundo, el modelo de ensemble ViT mostró ser mejor en términos de exactitud macro que el modelo convolucional E-Triple. Las pruebas estadísticas respaldan la diferencia significativa observada en términos de medias de exactitud. Es así como, para datos no balanceados, los modelos de ensemble ViT pueden ser eficaces, en comparación con modelos de ensemble convolucionales. En términos individuales la arquitectura transformer también mostró ser mejor que su contraparte convolucional.

Además, a pesar de los resultados prometedores de este estudio, hay limitaciones que considerar. Primero, los experimentos realizados se hicieron con un único conjunto de datos, especializado en plantas de Costa Rica, por lo que sus resultados podrían no ser extrapolables. Además, los hiperparámetros de los modelos no necesariamente son los óptimos para el desempeño de estos, y tampoco el número de épocas. Se podría explorar el efecto de entrenar con configuraciones distintas. Así mismo, esta investigación solo toma en cuenta una de sus métricas para validar las hipótesis planteadas, pero se podrían extender para evaluar el rendimiento de los ensembles con diferentes métricas. También es necesario que se considere el impacto ambiental de entrenar y ejecutar modelos ensemble, lo cual al menos puede duplicar los recursos computacionales y energéticos necesarios para entrenar un modelo individual.

CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio proporciona evidencia sólida de que los modelos de ensemble, especialmente aquellos basados en la arquitectura transformer como ViT, pueden ofrecer mejoras significativas en la clasificación de flora, especialmente en entornos con desbalances de datos. Los resultados respaldan la superioridad de los ensembles sobre los modelos individuales, así como la ventaja del enfoque transformer sobre las redes convolucionales en este contexto específico. Sin embargo, se reconocen limitaciones importantes, como la falta de generalización debido al uso de un único conjunto de datos y la necesidad de explorar diferentes configuraciones de hiperparámetros. A pesar de ello, este estudio marca un avance importante en la aplicación práctica de modelos de aprendizaje automático en la clasificación de flora y sugiere áreas futuras de investigación para mejorar aún más la eficacia y eficiencia de estos modelos en el mundo real.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y Comunicación y los profesores Dr. Allan Berrocal Rojas y Dr. Ignacio Diaz Oreiro de la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática.

REFERENCIAS

- [1] E. Carranza-Rojas Jose AND Mata-Montero, «Combining Leaf Shape and Texture for Costa Rican Plant Species Identification», *CLEI Electronic Journal*, vol. 19, pp. 7-7, may 2016, [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-50002016000100007&nrm=iso
- [2] A. Karnan y R. Ragupathy, «A Comprehensive Study on Plant Classification Using Machine Learning Models», en *ICT: Smart Systems and Technologies*, M. S. Kaiser, J. Xie, y V. S. Rathore, Eds., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 187-199.
- [3] J. Li y J. Yang, «Supervised Classification of Plant Image Based on Attention Mechanism», en *2021 7th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICSAI53574.2021.9664220.

- [4] R. Gonzalez-Villanueva y J. Carranza-Rojas, «Improving Balanced Accuracy for Minority Plant Species Under Data Imbalance: A Multi-Architectural Ensemble Approach», en *2023 IEEE 5th International Conference on BioInspired Processing (BIP)*, 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/BIP60195.2023.10379201.
- [5] A. Dosovitskiy et al., «An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale». 2021.
- [6] H. Touvron, M. Cord, y H. Jégou, «DeiT III: Revenge of the ViT». 2022.
- [7] J. Maurício, I. Domingues, y J. Bernardino, «Comparing Vision Transformers and Convolutional Neural Networks for Image Classification: A Literature Review», *Applied Sciences*, vol. 13, n.o 9, 2023, doi: 10.3390/app13095521.
- [8] H. He, Y. Bai, E. A. Garcia, y S. Li, «ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning», en *2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008, pp. 1322-1328. doi: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.
- [9] N. V Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, y W. P. Kegelmeyer, «SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique», *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 16, pp. 321-357, jun. 2002, doi: 10.1613/jair.953.
- [10] Y.-S. Jeon y D.-J. Lim, «PSU: Particle Stacking Undersampling Method for Highly Imbalanced Big Data», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131920-131927, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009753.
- [11] M. Galar, A. Fernandez, E. Barrenechea, H. Bustince, y F. Herrera, «A Review on Ensembles for the Class Imbalance Problem: Bagging-, Boosting-, and Hybrid-Based Approaches», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 42, n.o 4, pp. 463-484, 2012, doi: 10.1109/TSMCC.2011.2161285.
- [12] Y. Arun y G. S. Viknesh, «Leaf Classification for Plant Recognition Using EfficientNet Architecture», en *2022 IEEE Fourth International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC)*, 2022, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICAEECC54045.2022.9716637.
- [13] L.-H. Li y R. Tanone, «Ensemble Learning based on CNN and Transformer Models for Leaf Diseases Classification», en *2024 18th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, 2024, pp. 1-6. doi: 10.1109/IMCOM60618.2024.10418393.
- [14] S. P. Kyathanahally et al., «Ensembles of data-efficient vision transformers as a new paradigm for automated classification in ecology», *Sci Rep*, vol. 12, n.o 1, p. 18590, 2022.
- [15] D. D. K. R. W. Dandeniya, B. C. T. Wickramasinghe, y C. Dasanayaka, «A Web-based Application for Snake Species Identification using Vision Transformer and CNN-based Ensemble Meta Classifier», en *2022 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*, 2022, pp. 1-5. doi: 10.1109/PuneCon55413.2022.10014812.
- [16] J. Yosinski, J. Clune, Y. Bengio, y H. Lipson, «How transferable are features in deep neural networks?» 2014.
- [17] K. He, X. Zhang, S. Ren, y J. Sun, «Deep Residual Learning for Image Recognition». 2015.
- [18] M. Tan y Q. V Le, «EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks». 2020.
- [19] Z. Liu, H. Mao, C.-Y. Wu, C. Feichtenhofer, T. Darrell, y S. Xie, «A ConvNet for the 2020s». 2022.
- [20] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, K. Li, y L. Fei-Fei, «ImageNet: A large-scale hierarchical image database», en *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009, pp. 248-255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848.

- [21] D. Choi, C. J. Shallue, Z. Nado, J. Lee, C. J. Maddison, y G. E. Dahl, «On Empirical Comparisons of Optimizers for Deep Learning». 2020.
- [22] T. Yu y H. Zhu, «Hyper-Parameter Optimization: A Review of Algorithms and Applications». 2020.
- [23] D. P. Kingma y J. Ba, «Adam: A Method for Stochastic Optimization». 2017.
- [24] I. Loshchilov y F. Hutter, «SGDR: Stochastic Gradient Descent with Warm Restarts». 2017.
- [25] S. P. Wright, «Adjusted p-values for simultaneous inference», *Biometrics*, pp. 1005-1013, 1992.

Ciencias de datos

Modelado autorregresivo y dinámico de tasas de interés para el BCCR

Autoregressive And Dynamic Modeling of Interest Rates For The BCCR

Ing. Leonardo Marín Paniagua, PhD.

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), UCR
e-mail: leonardo.marin@ucr.ac.cr*

Ing. Mercedes Chacón Vásquez, PhD.

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), UCR
e-mail: mercedes.chaconvasquez@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Filtros de Kalman, modelo dinámico Nelson-Siegel (DNS), modelo vectorial autorregresivo (VAR), optimización, tasa de interés.

Keywords:

Dynamic Nelson-Siegel (DNS) model, interest rate, Kalman filters, optimization, vector autoregressive model (VAR).

RESUMEN

Se presenta un caso de estudio para el Banco Central de Costa Rica (BCCR) para el cual se propusieron dos modelos matemáticos ajustados con técnicas de optimización y filtros de Kalman, utilizando estimadores lineales VAR y una variante del modelo dinámico de Nelson-Siegel (DNS), con índices financieros y variables macroeconómicas. Se realizó una comparativa de la exactitud del pronóstico de la tasa de interés de los bonos del Tesoro de Estados Unidos de dos años, para los modelos validados con una base de datos actualizada del año 2000 al 2022, obteniendo estimaciones de la tasa de interés con buena exactitud.

ABSTRACT

A case study is presented for the Central Bank of Costa Rica (BCCR) for which two mathematical models adjusted with optimization techniques and Kalman filters were proposed, using linear VAR estimators and a variant of the dynamic Nelson-Siegel (DNS) model, with financial indexes and macroeconomic variables. A comparison of the forecast accuracy of the interest rate of two-year U.S. Treasury bonds was accomplished, obtaining interest rate estimates with good accuracy for the validated models with an updated database from 2000 to 2022.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación busca contribuir a la gestión de reservas. Debido a la situación económica experimentada durante la pandemia, en donde durante el 2021 por primera vez en la historia del índice de bonos del Tesoro de 1 a 3 años, se tuvo un rendimiento negativo, lo cual afectó en gran medida a los bancos centrales, lo cual produjo a su vez cambios significativos en el esquema de administración de las reservas internacionales. La evolución de las tasas de interés puede estudiarse como un sistema complejo y con ruido, el cual puede caracterizarse mediante modelos lineales y no lineales, dinámicos, utilizando los estimadores de estado como el filtro de Kalman y herramientas de optimización para aproximar sus parámetros. La incorporación de los modelos ajustados mediante estas técnicas modernas de estimación a las herramientas que las personas gestoras de las reservas utilizan actualmente, tienen el potencial de convertirse en un importante apoyo y referencia para mantener y generar mayores retornos en estas inversiones. Para este fin, se proponen dos modelos dinámicos: un modelo vectorial autoregresivo (VAR) y una variante del modelo dinámico de Nelson-Siegel (DNS), que permitan estimar la tasa de interés de los bonos del Tesoro de Estados Unidos de dos años y pronosticarla a 4 meses.

II. METODOLOGÍA

En cuanto a los datos utilizados para la estimación de los modelos $VAR(p)$ y DNS, se generó una base de datos con ayuda del personal del Departamento de Reservas del BCCR, cuya información fue tomada de Bloomberg y abarca del 1990 al 2022, conteniendo la evolución mensual de las tasas de interés de los bonos del Tesoro de Estados Unidos, con distintos vencimientos. Es de particular interés para este estudio la tasa de interés para los bonos de dos años de madurez, al ser la más relevante para la evaluación del retorno de las carteras de inversión del BCCR, estando actualizados con la información de los últimos 22 años a diferencia estudios anteriores como [1] y [2]. Se incluyeron además once indicadores económicos según se definen más adelante.

El modelo $VAR(p)$ es el modelo lineal en que cada variable es explicada por los rezagos de las variables del sistema y los errores estocásticos que aparecen en cada ecuación. No se distinguen entre variables endógenas y exógenas. Contiene un sistema de n ecuaciones de n variables de respuesta estacionarias distintas como funciones lineales de respuestas retardadas y otros términos. Se elige este modelo como una de las opciones porque permite representar la correlación entre el grupo de variables de los indicadores económicos y la tasa de interés a estimar. Es posible generalizar el modelo el rendimiento al vencimiento τ , usando un modelo VAR que se estima sobre los datos disponibles para ese vencimiento:

$$y_t = c + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

En donde el coeficiente de dimensión, $y_t = [y_t(\tau_1), y_t(\tau_2), \dots, y_t(\tau_N)]'$ es un vector de dimensión que contiene series de tiempo de diversas variables incluidas en el VAR, c es igualmente un vector

columna de interceptos, y ϵ_t es un vector de perturbaciones estocásticas con media cero y varianza constante [3]. Se incorporó la herramienta llamada Econometrics Toolbox™ de Matlab para modelar un $\text{VAR}(p)$ mediante la función *varm*, que devuelve un objeto que incluye el número de series temporales y el orden del polinomio autorregresivo multivariado que especifican completamente la estructura del modelo. También estima los coeficientes que son valores de parámetros desconocidos, con la función *estimate*, que almacena los valores de los parámetros estimados resultantes de ajustar el modelo $\text{VAR}(p)$ a todas las variables de la matriz Y de series de respuestas multivariadas observadas. Finalmente, se usa la función *forecast* para pronosticar para una serie de datos futuros según se establece en [4].

Por otra parte, el modelo dinámico de Nelson y Siegel (DNS) [2] y [5] realiza la estimación del rendimiento al vencimiento considerando tres términos variantes en el tiempo, correspondientes al nivel o factor de largo plazo, la pendiente o factor de corto plazo y curvatura o factor de mediano plazo, y los términos que multiplican son pesos de estos factores. El valor de λ gobierna la tasa de decaimiento exponencial del modelo, según la ecuación:

$$y_t(\tau) = L_t + S_t \left(\frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda\tau} \right) + C_t \left(\frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda\tau} - e^{-\lambda\tau} \right) \quad (2)$$

Según [2], como los movimientos dinámicos de L_t , S_t , y C_t siguen la forma de un proceso de primer orden con vectores autorregresivos (ARMA), entonces el modelo puede escribirse como un Modelo en Variables de Estado (MVE). La ecuación de transición de estados describe la evolución de la dinámica del vector de estados:

$$\begin{pmatrix} L_t - \mu_L \\ S_t - \mu_S \\ C_t - \mu_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{t-1} - \mu_L \\ S_{t-1} - \mu_S \\ C_{t-1} - \mu_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta_t(L) \\ \eta_t(S) \\ \eta_t(C) \end{pmatrix} \quad (3)$$

En donde μ_L , μ_S , y μ_C es la media de los factores L_t , S_t , y C_t respectivamente. El modelo estimará estos factores cada cierto tiempo, normalmente mensualmente, en el periodo de observación ($t=1, \dots, T$), dado por la cantidad de mediciones disponibles en la base de datos generada. Por otra parte, la ecuación de medición (observación) se generaliza para relacionar un conjunto de rendimientos a estos tres factores:

$$\begin{pmatrix} y_t(\tau_1) \\ y_t(\tau_2) \\ \vdots \\ y_t(\tau_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1 - e^{-\tau_1\lambda}}{\tau_1\lambda} & \frac{1 - e^{-\tau_1\lambda}}{\tau_1\lambda} - e^{-\tau_1\lambda} \\ 1 & \frac{1 - e^{-\tau_2\lambda}}{\tau_2\lambda} & \frac{1 - e^{-\tau_2\lambda}}{\tau_2\lambda} - e^{-\tau_2\lambda} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{1 - e^{-\tau_N\lambda}}{\tau_N\lambda} & \frac{1 - e^{-\tau_N\lambda}}{\tau_N\lambda} - e^{-\tau_N\lambda} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_t \\ S_t \\ C_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_t(\tau_1) \\ \epsilon_t(\tau_2) \\ \vdots \\ \epsilon_t(\tau_N) \end{pmatrix} \quad (4)$$

Este MVE del modelo DNS, constituido por la ecuación de transición de estados (3) y la ecuación de observación (4), puede reescribirse [2] en forma vectorial/matricial según:

$$\begin{aligned}(f_t - \mu) &= A(f_{t-1} - \mu) + \eta_t, \\ y_t &= \Lambda f_t + \varepsilon_t.\end{aligned}\tag{5}$$

En donde η_t, ε_t son procesos de ruido blanco, de varianza unitaria, no correlacionados. Asimismo, f_t corresponde a los factores L_t, S_t , y C_t ajustados por sus respectivas medias μ , y por otra parte y_t corresponde a los rendimientos observados. Para mantener la optimalidad de mínimos cuadrados lineales del filtro de Kalman [6] y poder usar este filtro para estimar los parámetros del modelo junto con técnicas de optimización, se requiere que las perturbaciones de ruido blanco (WN) en la transición de estados y en la ecuación de la medición/observación H sean ortogonales entre sí [2] y con respecto al estado inicial, esto se define de forma simbólica mediante:

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \eta_t \\ \varepsilon_t \end{pmatrix} &\sim WN \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} Q & 0 \\ 0 & H \end{pmatrix} \right], \\ E(f_0 \eta'_t) &= 0, \\ E(f_0 \varepsilon'_t) &= 0.\end{aligned}\tag{6}$$

En la mayoría del análisis realizado por [1] y [2] se asume que la matriz H es diagonal, y que la matriz no es diagonal, pero si simétrica, lo que implica que las desviaciones de rendimientos de distinta madurez no están correlacionadas, lo cual es bastante estándar [2]. El MVE se reescribe considerando que los estados se definen como $x_t = f_t - \mu$, correspondiente a los factores ajustados por su media, y además considerando que se define $\tilde{y}_t = y_t - \Lambda \mu$ como los rendimientos ajustados por el intercepto ($\Lambda \mu$), obteniendo el MVE del modelo DNS, definido también como el MVE de Diebold-Li [1]:

$$\begin{aligned}x_t &= Ax_{t-1} + \eta_t \\ \tilde{y}_t &= \Lambda x_t + \varepsilon_t\end{aligned}\tag{7}$$

Como se comentó anteriormente, al tener la presencia de los ruidos η_t y ε_t en el MVE, se recurre a la aplicación del filtro de Kalman (KF , Fig. 1) [6], para la estimación del estado $x_t = f_t - \mu$. En particular, se tienen trabajos previos [7] en donde se da la aplicación del MVE de la ecuación (7) y filtros de Kalman, empleando un modelo DNS y filtros Kalman para estimación de sus parámetros, al igual que en [2].

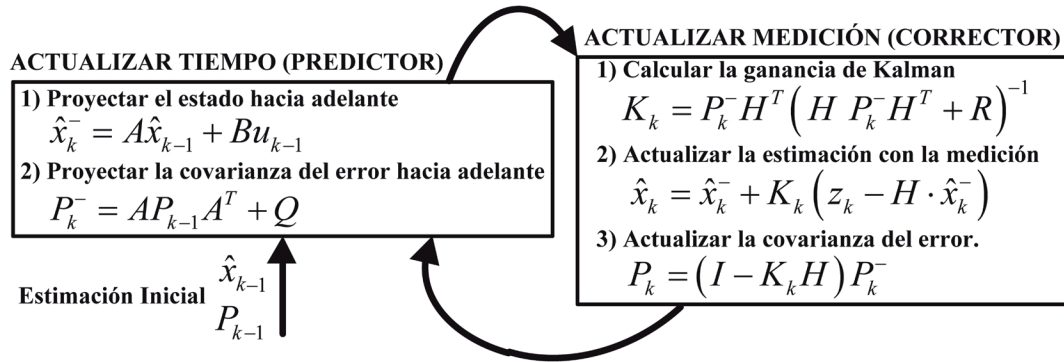


Fig. 1. Estructura Predicción/Corrección en el Filtro de Kalman [6]

Para la estimación de los parámetros del modelo, se procedió utilizando la herramienta *Econometrics Toolbox*TM de Matlab, utilizando la base de datos generada, pero tomando únicamente en cuenta los rendimientos históricos, sin tomar en cuenta los indicadores macroeconómicos para esta estimación. Se estiman los parámetros del modelo mediante la función *estimate* de Matlab, así como la función de optimización *fminunc* (optimización lineal sin restricciones con algoritmo *Quasi-Newton*), en conjunto con el filtro de Kalman que se aplica en cada iteración para calcular la verosimilitud, y posteriormente también es utilizado en el suavizado de los parámetros estimados. La estimación con este método es sensible a la definición de los parámetros iniciales, por lo que se asignan estos valores mediante una estimación preliminar mediante un modelo VAR similar al descrito con anterioridad según [1].

III. RESULTADOS

Fue posible estimar el modelo VAR con diez factores macroeconómicos: El Gasto básico de consumo personal deflacionario de USA (identificador *PCEDEF*), la tasa de fondos federales (*FEDL01*), el Índice de Expectativas de inflación a 1 año de la Universidad de Michigan (*CONSPXMD*), la Tasa de utilización de la capacidad de producción (*CPMFTOT*), el Índice de Gasto básico de consumo personal (*PCECYOY*), los índices para un coste de cobertura (*FXHCUSJP*, *FXHCUSEU*), la Regla de Taylor y el Índice de Servicios (*ISM*). En la Fig. 2 se observa la tasa con la base de datos generada y la predicción del modelo VAR de mejor ajuste, en la región sombreada de la derecha, con un intervalo de confianza del 95%. Se observa que la tasa de interés se encuentra entre los márgenes de confiabilidad deseados y estima correctamente la tendencia al alza que se presentaba en el momento de estudio, para los datos del último año (2022-2023) disponibles en la base de datos generada.

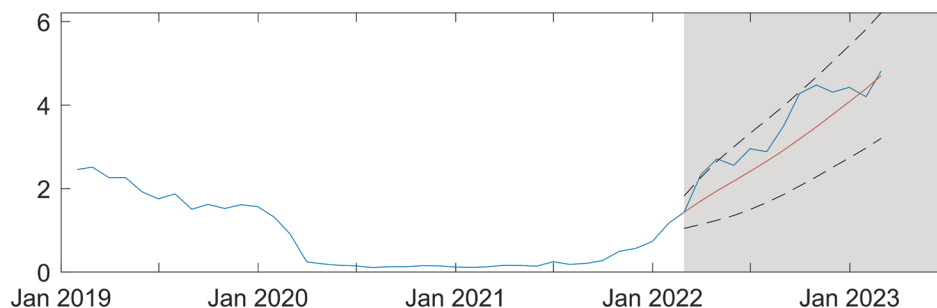


Fig. 2. Evolución temporal (azul) y pronóstico de la tasa de interés (rojo) con el modelo VAR

En cuanto al modelo DNS, después de múltiples iteraciones y entrenamientos preliminares, se logró realizar una estimación del modelo utilizando únicamente los valores de los rendimientos históricos de la base de datos generada (DNS_{rend}), utilizando todos los datos disponibles, a excepción de los últimos cuatro valores mensuales de la base de datos que se utilizan para validación de los pronósticos, a fin de obtener el menor error posible en la predicción del modelo. Esto fue requerido debido a la sensibilidad de la estimación mediante el método de ajuste del modelo y a la volatilidad que se tuvo los últimos meses de la base de datos utilizada en los rendimientos de los bonos del Tesoro, debido a la situación económica mundial de finales del 2022. En la Fig. 3 se observa la tasa a dos años con la base de datos generada y la predicción del modelo DNS_{rend} de mejor ajuste, en la región sombreada de la derecha, con un intervalo de confianza del 95%, para los últimos cuatro meses de la base de datos. Se aprecia la cercanía del pronóstico del DNS_{rend} a la evolución de la tasa observada en el mercado.

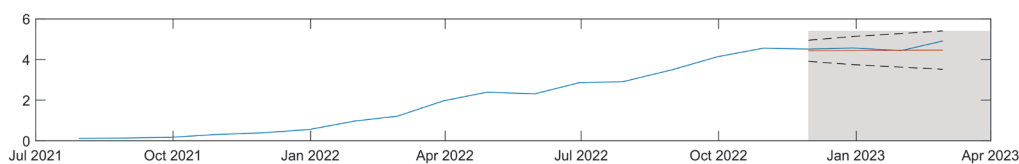


Fig. 3. Evolución temporal (azul) y pronóstico de la tasa de interés (rojo) con el modelo DNS_{rend}

En el CUADRO I se observan los valores estimados de los rendimientos mediante los modelos VAR y DNS contra los pronosticados por el mercado mediante la tasa forward (Fwd) de un mes, que usa el modelo del BCCR actualmente, así como las tasas de interés observadas en el mercado, para los últimos seis meses de la base de datos generada. Al estudiar los errores absolutos de los modelos respecto al valor observado en el mercado, se encontró que la tasa de interés se logra pronosticar con gran precisión mediante los métodos propuestos. Se denota que las estimaciones del modelo DNS_{rend} presentan un error mucho menor respecto al utilizar la tasa forward, a pesar de que solo logró realizar la predicción para los últimos cuatro meses. El VAR muestra errores variados, elevados respecto a la tasa forward para los primeros meses y menores para los últimos meses de la estimación, incluso que el modelo DNS_{rend} .

CUADRO I
PRONÓSTICO DE RENDIMIENTOS ANTE DIFERENTES ESCENARIOS

Fecha	Observada (mercado)	Fwd 1 mes	VAR	DNS_{rend}	Error Fwd 1mes	Error VAR	Error DNS_{rend}
30/09/2022	4.28	3.52	3.19	4.28	0.76	1.09	-
31/10/2022	4.48	4.28	3.48	4.48	0.2	1	-
30/11/2022	4.31	4.51	3.77	4.43	-0.2	0.54	-0.12
31/12/2022	4.43	4.31	4.08	4.44	0.12	0.35	-0.01
31/01/2023	4.20	4.41	4.39	4.45	-0.21	-0.19	-0.25
28/02/2023	4.82	4.13	4.71	4.46	0.69	0.11	0.36

Finalmente, se realiza un pronóstico de cuatro meses hacia el futuro, a partir del 31/10/2022, de la tasa con los modelos VAR y DNS_{rend} , al excluir los últimos cuatro meses disponibles en la base de datos generada a fin de utilizarlos para validar el pronóstico, según se comentó anteriormente, lo cual se muestra en la Fig. 4. Se observa la bondad de ambos modelos respecto al valor observado de la evolución de la tasa de interés, teniendo pronósticos cercanos al valor observado en el mercado y dentro del intervalo de confianza (95%), siendo el modelo DNS_{rend} más cercano al valor observado en el mercado, respecto al VAR .

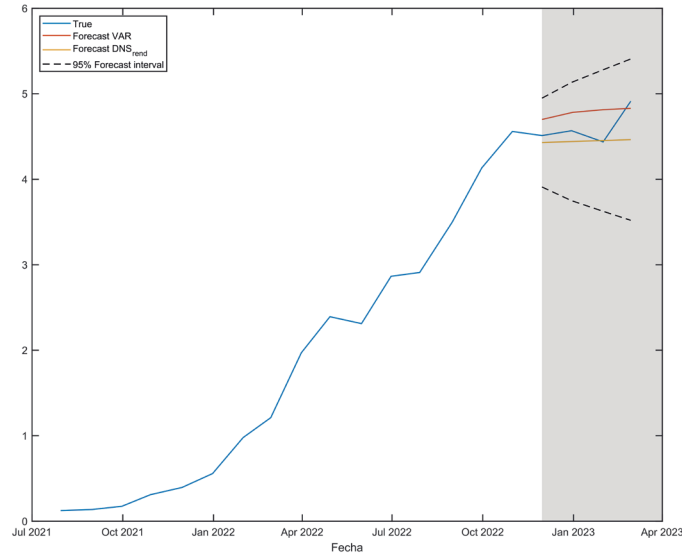


Fig. 4. Estimación temporal de la tasa de interés con los modelos propuestos, evolución temporal observada (azul), pronóstico VAR (rojo) y pronóstico DNS_{rend} (amarillo)

CONCLUSIONES

Se proponen dos modelos matemáticos autorregresivos de predicción usando un modelo VAR y una variante del modelo dinámico Nelson-Siegel (DNS_{rend}) a partir de las tasas de interés históricas

y utilizando variables macroeconómicas, los cuales estiman la tasa de interés de los bonos del Tesoro de Estados Unidos de dos años de vencimiento, con buena exactitud, gracias a los métodos de ajuste mediante técnicas de optimización y filtro de Kalman empleadas para este fin. A partir de la comparativa realizada de la exactitud del pronóstico de la tasa de dos años para ambos modelos, se concluye que estos logran aproximar correctamente la tasa, con índices de error muy bajos respecto a la tasa observada en el mercado, siendo el DNS_{rend} un poco más cercano que el VAR según la tendencia observada. Debido a los buenos resultados obtenidos, se considera que, si se incorporan los modelos desarrollados a las herramientas que las personas gestoras de las reservas utilizan actualmente, tienen el potencial de convertirse en un importante apoyo y referencia para mantener y generar mayores retornos de las carteras de inversión de las reservas internacionales.

AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras de este trabajo agradecen la colaboración del M. S.c. Mario Ramos del BCCR.

REFERENCIAS

- [1] F. X. Diebold y C. Li, «Forecasting the term structure of government bond yields,» *Journal of Econometrics*, vol. 130, pp. 337-364, 2006.
- [2] F. X. Diebold, G. D. Rudebusch y S. B. Aruoba, «The macroeconomy and the yield curve: a dynamic latent factor approach,» *Journal of Econometrics*, vol. 131, pp. 309-338, 2006.
- [3] M. M. W. James H. Stock, *Introducción a la Econometría*, Pearson Education, 2012.
- [4] J. F. Caldeiraa, G. V. Mourab y A. A. P. Santos, *Predicting the yield curve using forecast combinations*, 2014.
- [5] C. Nelson y A. Siegel, «Parsimonious modelling of yield curves,» *Journal of Business*, vol. 60, p. 473-489, 1987.
- [6] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H_∞ , and Nonlinear Approaches.*, John Wiley & Sons, 2006.
- [7] Z. Huang, «Fitting Yield Curve with Dynamic Nelson-Siegel Models: Evidence from Sweden,» 2021.

New-flow Based Attack Mitigation in Software-Defined Resource-Constrained Networks

Mitigación de ataques basados en nuevo flujo en redes definidas por software con recursos limitados

Sofía Villalta Jinesta

Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: sofia.villaltajinesta@ucr.ac.cr

Mónica Chaves Calvo

Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: monica.chavescalvo@ucr.ac.cr

Gustavo Núñez Segura

Escuela de Ingeniería, Coordinador Laboratorio de Telecomunicaciones, UCR

e-mail: gustavoalonso.nunez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Redes definidas por software, denegación de servicio, Internet de las cosas, ciberseguridad, redes de sensores inalámbricos.

Keywords:

Software-defined networking, denial of service, Internet of things, cybersecurity, wireless sensor networks

RESUMEN

Este trabajo presenta una estrategia de mitigación de ataques de denegación de servicio y ataques de denegación de servicio distribuidos, basados en nuevos flujos, para redes de sensores inalámbricos definidos por software. Esta estrategia se basa en el bloqueo de tráfico proveniente de nodos previamente identificados como atacantes. Para detectar los atacantes, cada nodo fue programado para detectar anomalías en su comportamiento, que podrían ser causadas por el reenvío de tráfico con flujos desconocidos, e informarlas al controlador SDN. El controlador SDN identifica los atacantes a partir de la cantidad de alarmas que coincidan con un mismo nodo. Luego, el controlador SDN envía un mensaje a los vecinos de cada atacante identificado para bloquear el tráfico proveniente de ese nodo. Se realizaron simulaciones con 100 nodos, siendo 10 de ellos atacantes. Los resultados muestran que esta estrategia fue capaz de mitigar el ataque, bloqueando un poco más de 95 % del tráfico no deseado. Esta propuesta ofrece una solución para mitigar ataques basados en nuevos flujos en redes definidas por software con recursos limitados, particularmente efectiva para dispositivos IoT.

ABSTRACT

This work presents a mitigation strategy of new-flow based Denial-of-Service and Distributed Denial-of-Service attacks in resource constrained Software-Defined Networks. The strategy focuses on blocking traffic from nodes previously identified as attackers. To accomplish this, every node in the network was programmed to detect anomalies in its behavior, that could be caused by unknown flow packets forwarding, and inform them to the SDN controller. The SDN controller identifies the attackers based on the number of alarms received that match the same node. Then, the SDN controller sends a message to the attacker's neighbors to block malicious traffic. Simulations with 100 nodes, including 10 attackers, were conducted. Results show this strategy was able to mitigate the attack by blocking over 95% of malicious traffic. Our proposal offers cost-effective solution to mitigate new-flow attacks in SDN networks, enhancing security particularly for IoT devices.

I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSN) is a group of small computers with the main target of identifying a physical property of their surroundings. These properties can illustrate changes like humidity, temperature, conductivity, vibration, and speed. The devices that form this network are made of thousands of sensors or nodes. Each node is connected to others via wireless communication. One or more of these nodes are called sink or base station, which is in charge of connecting the network with the external environment [1].

Software-Defined Networking (SDN) can be used to increase the programmability and simplify network management of WSNs. Also, SDN is fundamental in the scope of this project. The technology of programmable networks or SDN (Software-Defined Networking) represents an innovative approach where network intelligence is concentrated in software-based controllers, while network devices, such as OpenFlow switches, operate as simple data forwarding devices that can be programmed through an open interface [2][3].

In the SDN paradigm, network devices have flow tables with rules to forward, discard, or receive packets. The SDN controller is in charge of configuring these rules in all of the network devices. When a network device receives a new packet, it looks for a match in the flow table. If there is a match, the corresponding action is applied. If not, the packet is stored, and the network device asks the controller for a rule to apply. If a network device receives a large number of packets without a rule match in a short period, it should request rules to handle them. This situation creates abnormal packet traffic that can saturate communication resources and network devices' flow tables. This operational behavior makes SDN vulnerable to Denial-of-Service (DoS) and Distributed Denial-of-Service (DDoS) attacks [4]. Malicious nodes can generate packet traffic with unknown flows to create this abnormal traffic, a phenomenon known as new-flow-based attacks [5].

Resource-constrained networks, such as the Internet of Things (IoT), are vulnerable to DoS and DDoS attacks. The lack of processing power, memory space, bandwidth, and energy limits the capacity to implement security mechanisms to protect the network. To fill this gap, we continue the DDoS detection and attacker identification work presented in [6] by implementing a mitigation

strategy based on address blocking. This proposal was tested by simulating networks with 100 nodes, where 10% of them executed a new-flow-based attack. Additionally, we measured the efficiency of the mitigation strategy by varying the interval of malicious traffic generation among 60 s, 30 s, and 1 s. The results showed that the strategy can mitigate the attack when the attackers generate traffic every 60 s and 30 s but not for the case of 1 s.

The remainder of the paper is organized as follows: Section II analyzes the related work, Section III explains the proposal, Section IV describes the experiments, Section V analyzes the results, and Section VI concludes the paper.

II. RELATED WORK

Different studies have proposed various strategies to reduce new-flow attacks in SDN networks. On one hand, some works have focused on using machine learning techniques to identify and prevent attacks, while others have used flow rules and security policies to restrict unauthorized access to the network.

In [7], the authors analyze the potential threats to SDNs, providing a comprehensive understanding of the risks and vulnerabilities in this area. They propose various mitigation strategies to counteract these threats, such as system replication, use of diverse systems, dynamic switch association, establishment of trust among controllers and devices, and the use of secure components. The authors advocate for the integration of security and dependability from the design phase of SDNs. This implies a proactive rather than reactive approach to security and reliability, which is innovative in the field.

The contribution of FlowSec [8] to the subject of SDN lies in the proposal and implementation of FlowSec, a strategy for mitigating Denial-of-Service (DoS) attacks on SDN controllers. FlowSec introduces the concept of rate limiting to control the number of packets sent to the controller, thereby preventing attacks on the control plane bandwidth. The document provides insights into the challenges posed by SDN and presents a practical solution for enhancing the security and stability of SDN networks.

Some works, such as [9][10][11], have proposed methods to secure WSN using SDN while considering resource constraints. However, these works have not attained intrusion detection rates over 90%, a limitation commonly observed in this type of network.

In [6], the authors proposed a hybrid method to increase the intrusion detection rate on WSNs using SDN while considering memory and processing constraints. Their proposal is based on centralized network monitoring to detect anomalies while every node is aware of detecting anomalies in its own behavior. Through this, the SDN controller is able to detect anomalies that impact network performance as well as those with localized impact. However, their proposal does not include strategies to mitigate the impact of these intrusions.

In this work, we extend the research in [6] by implementing a mitigation strategy for new-flow-based attacks in WSNs. Our implementation uses the SDN paradigm while considering resource constraints. We demonstrate the performance of the mitigation strategy through the analysis of the number of control packets before, during, and after the attack

III. PROPOSAL

To achieve mitigation of new-flow attacks, a strategy based on address blocking was implemented. An attack can be detected by monitoring the network flow for any anomalies. When a network shows a significant change from its normal flow and experiences a high rate of flow entries, an alert is generated, as this could indicate a new-flow attack [5].

Our proposal is to block malicious traffic by warning the WSN nodes about an attacker in their neighborhood. To attain this objective, we followed the anomaly detection and attacker identification strategy proposed in [6]. This strategy follows these steps:

1. Every node executes anomaly detection using a change point detection algorithm [12] on a time series of transmitting time. Transmitting time is a metric that represents the time the radio module remains transmitting.
2. When a node detects an anomaly in the transmitting time, it sends an alarm to the SDN controller, including the address of a suspect. The algorithm used to determine the suspect can be found in [6].
3. The SDN controller receives the alarm and executes an attacker identification algorithm using the suspect address as input.

A. Attack Mitigation

Our new-flow-based attack mitigation proposal is divided into two steps: attacker identification and traffic blocking. We implemented the attacker identification algorithm published in [6]. In summary, every node is aware of detecting anomalies in its behavior, which are then reported to the SDN controller.

For this specific case, nodes maintain a list of data packets with unknown flows and the sender address. The behavior anomaly detector is configured to monitor transmitting time. When an anomaly in transmitting time is detected, the next step is to identify a suspect responsible for this abnormal behavior. Using the list of data packets with unknown flows, the address with the highest number of entries is chosen and reported to the SDN controller.

Once an attacker is identified, the SDN controller sends an alarm to the attacker's neighborhood. To accomplish this, the SDN controller prepares a source-routed packet to each node in the attacker's neighborhood, containing the attacker's address. When a node receives this packet, the attacker's

address is included in a blacklist. Any new packet whose source address matches the attacker's address is subsequently dropped. By doing this, the new-flow-based attack is mitigated effectively.

IV. METHODS

The mitigation performance was evaluated from simulations of a Software-defined wireless sensor network (SDWSN) under a FDFF attack. The FDFF attack is a new-flow based attack that uses the attacker's neighbors to multiply the number of flow request packets in the network, increasing both the possibilities of congestion and the controller resource usage. This attack was proposed in [13].

A topology with 100 nodes was set to evaluate the performance of mitigation. Three attack periods were used: 60 s, 30 s, and 1 s. For each attack period two different simulations were conducted, one without mitigation and one with mitigation. The objective was to compare both scenarios to evaluate the proposal mitigation performance. Ten iterations of each simulation scenario were made.

The evaluation of the mitigation proposal is based on the mitigation efficiency and mitigation time. Mitigation efficiency represents the percentage of malicious packet traffic that was discarded. This can be calculated as shown in Equation 1. Mitigation time measures our proposal mitigation delay and is measured as from the time the attack initiates up to the time the number of packets reach a value equal to the average before the attack.

$$\text{Mitigation efficiency} = \left(\frac{\text{Avg.during attack} - \text{Avg.after mitigation}}{\text{Avg.during attack}} \right) * 100 \quad (1)$$

The whole implementation and experimentation was conducted using IDIT-SDN [14] and Cooja Simulator [15]. IDIT-SDN is an extension of IT-SDN, which is a framework for SDWSNs [16]. Cooja provides a simulation environment specifically designed for Wireless Sensor Networks (WSNs). This allowed for a clearer observation of node behavior, interactions with neighboring nodes, the controller, and other network parameters directly within the simulated network. A summary of simulation parameters is shown in CHART I.

CHART I
SIMULATION PARAMETERS

Simulation Parameters	
Topology	Square grid
Number of nodes	100
Simulation time (h)	5
Node boot interval (s)	0,1
Number of sinks	1
Sinks position	Middle of the grid edge
Controller position	Center
Data traffic rate	One packet every minute
Management traffic rate	One packet per minute
Data payload size	10 bytes
Management payload size	10 bytes
Data traffic start time	300s + [0-60]
Radio module power	0 dB
Attacks start after (h)	3,8

V. RESULTS ANALYSIS

As it can be seen from the Fig. 1 using the mitigation proposal is possible to reduce control packet overhead caused by the FDFP attack. These figures represent just one of the ten replications of each scenario.

Considering the attack starts when the first attacker triggers the first data packet with an unknown flow, this happens at minute 232 for the attack period of 30 and 60 s. This value is not consistent with the graph shown in 1a since there is a delay between the controller data and the Cooja Simulator time values. This delay is just caused by the simulator reference but it does not affect the metrics calculation.

For the attack period of 60 s, the examination reveals that the initial attack is detected at precisely 232 minutes, as indicated by the “CP detected” flag. By employing the attacker blocking function, the nodes around the attacker drop the packets coming from it. The warnings from the controller to the attacker neighbors are dispatched at the timestamp of 233.84 minutes.

For the attack period of 30 a similar analysis can be made, the start of the attack is at 232.03, the distributed detection of the attack starts at 233.48, and the warning is first dispatched at 233.49. There is also a slight delay between the controller data and the Cooja time values. The events timeline for both 60 s and 30 s is summarized in Table 2.

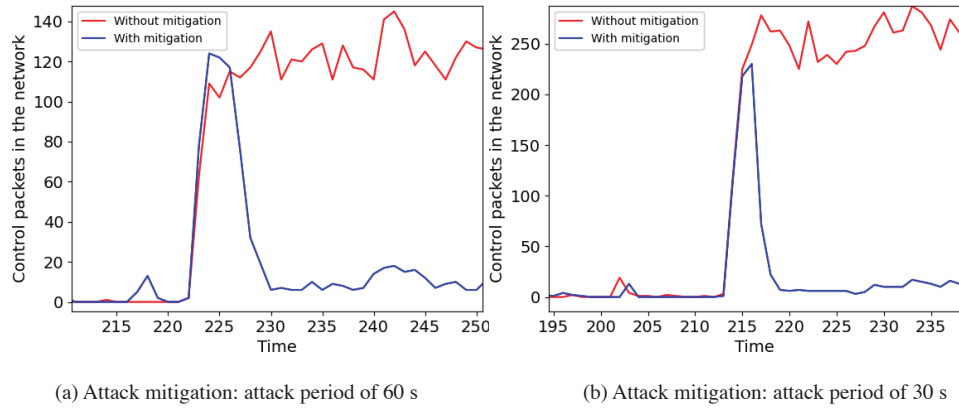


Fig. 1. Results for attack period of 30 seconds

CHART II

SUMMARY OF THE ATTACK AND MITIGATION TIMELINES

Attack period (s)	Start of attack (min)	Distributed detection (min)	Warning dispatched (min)	Packets dropped (min)	Mitigation begins (min)	Mitigation ends (min)
60	232	232,8	232,81	233,84	242,01	248,91
30	232,03	233,48	233,49	234,32	235,52	239,52

To affirm the effectiveness of the mitigation process, a systematic approach was adopted. Initially, the sample immediately preceding the onset of the attack was located, and the final value of the control packets in the network was ascertained, resulting in a value of 2,00. Subsequently, an average of all preceding values was computed; the average control packet rate before the FDFD attack was 5,55. During the attack, this average increased to 53,909, indicating a significant surge. However, upon applying mitigation measures, the average control packet rate decreased to 8,10.

We can calculate the mitigation efficiency by comparing the average control packet rate during the attack and after mitigation. Substituting the values obtained for the attack period of 60 s, we obtain:

$$\text{Mitigation Efficiency} = \left(\frac{103.4 - 8.54}{103.4} \right) * 100 = 95,22 \% \quad (2)$$

For the case of an attack period of 30 s, the control packet average before the attack was 3,81. When the attack started, the average number of control packets was 159.0. When the mitigation measures took effect, this average decreased to 7.92. With these numbers and applying Equation 1, the mitigation efficiency obtained was 95.01 %.

Lastly, a simulation was conducted with an attack period of 1 s. Once this simulation was done, it was observed that the behavior did not match with the expected results when compared to attack periods of 30 and 60. As a result, the simulation results were further analyzed to determine whether the packet delivery rate had the same behavior with or without mitigation. This comparison is graphically represented in Fig. 2.

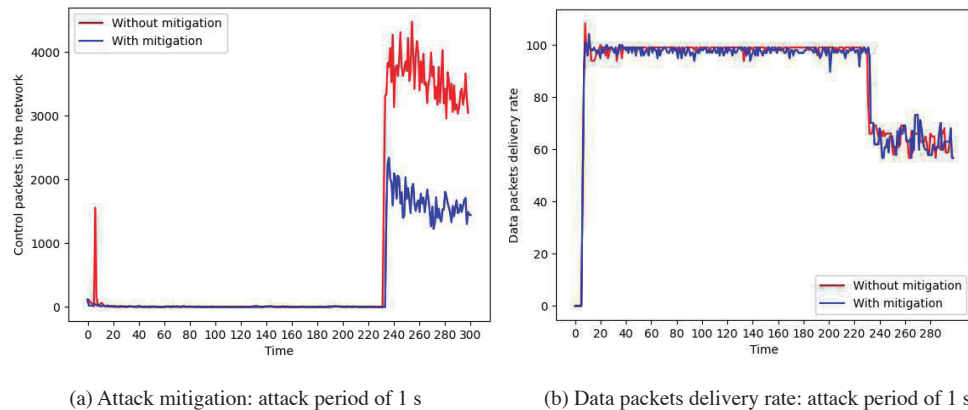


Fig. 2. Results for attack period of 1 second

First, it was observed that the peak of control packets is about 50 % of the peak for the case without mitigation. Then, we observed a small decrease in the control packets traffic that seems to be because of the attackers that have been blocked. However, the control packets remain over 1,000 packets per minute.

The reason for the reduction of the peak is a faster reaction in the detection and attackers blocking, which is also caused by the aggressiveness of the attack. Then, the mitigation is not as effective as in the other cases with an attack every 60 s and 30 s because only 72 % of the attacker neighbors received the warning. The remaining 28 % of nodes that did not receive the warning was caused by packet collisions. As shown in Fig. 2b, the delivery rate drops from close to 100 % to around 70 %. Considering the control packets peak without mitigation and the average control packets with mitigation, after the mitigation starts, the mitigation efficiency is around 70 %.

In summary, our proposal is able to mitigate about 95 % of malicious traffic generated by new-flow-based attacks. However, since our method requires that nodes around the attacker receive a notification, in cases of very aggressive attacks, this notification may not be delivered because of packet collisions, reducing the mitigation efficiency to around 70 %.

CONCLUSIONS

The proposed strategy demonstrates effectiveness in mitigating new-flow attacks in SDWSNs. Through the analysis of network flow anomalies and suspicious traffic, the proposed strategy

successfully detects and mitigates attacks, ensuring the security and stability of the network. The average mitigation time achieved in the experiments substantiates the viability of the approach, highlighting its potential for practical implementation in real-world SDN environments.

The experimental results confirm the effectiveness of the proposal in mitigating new-flow attacks. The average mitigation time obtained was 4 minutes for an attack period of 60 seconds and 6.9 minutes for an attack period of 30 seconds, eliminating 95 % of the malicious traffic.

However, this strategy has the drawback that the SDN controller must send a notification to the nodes around the attacker to execute the mitigation. In the case of aggressive attacks, collisions caused some nodes to not receive this notification, reducing the mitigation efficiency. For the case of an attack period of 1 second, only 70 % of the malicious traffic was blocked.

REFERENCES

- [1] A. Forster, *Introduction to wireless sensor networks*. John Wiley & Sons, 2016.
- [2] M. Dooley y T. Rooney, «Service Denial Attacks», 2017.
- [3] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan et al., «OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks», *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 38, n.º 2, págs. 69-74, mar. de 2008, ISSN: 0146-4833. DOI: 10.1145/1355734.1355746. dirección: <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>.
- [4] L. F. Eliyan y R. Di Pietro, «DoS and DDoS attacks in Software Defined Networks: A survey of existing solutions and research challenges», *Future Generation Computer Systems*, vol. 122, págs. 149-171, 2021.
- [5] T. Xu, D. Gao, P. Dong, H. Zhang, C. H. Foh y H.-C. Chao, «Defending Against New-Flow Attack in [1]SDN-Based Internet of Things», *IEEE Access*, vol. 5, págs. 3431-3443, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2666270.
- [6] G. A. N. Segura, A. Chorti y C. B. Margi, «Centralized and Distributed Intrusion Detection for Resource- Constrained Wireless SDN Networks», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n.º 10, págs. 7746-7758, 2022. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3114270.
- [7] D. Kreutz, F. M. Ramos y P. Verissimo, «Towards Secure and Dependable Software-Defined Networks», en *Proceedings of the Second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking*, e.p. HotSDN '13, Hong Kong, China: Association for Computing Machinery, 2013, págs. 55-60, ISBN: 9781450321785. DOI: 10.1145/2491185.2491199. dirección: <https://doi.org/10.1145/2491185.2491199>.
- [8] M. Kuerban, Y. Tian, Q. Yang, Y. Jia, B. Huebert y D. Poss, «FlowSec: DOS Attack Mitigation Strategy on SDN Controller», en *2016 IEEE International Conference on Networking, Architecture and Storage (NAS)*, 2016, págs. 1-2. DOI: 10.1109/NAS.2016.7549402.
- [9] D. Yin, L. Zhang y K. Yang, «A DDoS Attack Detection and Mitigation With Software-Defined Internet of Things Framework», *IEEE Access*, vol. 6, págs. 24 694-24 705, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831284.
- [10] C. Miranda, G. Kaddoum, E. Bou-Harb, S. Garg y K. Kaur, «A Collaborative Security Framework for Software-Defined Wireless Sensor Networks», págs. 1-1, 2020, ISSN: 1556-6021. DOI: 10.1109/TIFS.2020.2973875.

- [11] R. Wang, Z. Zhang, Z. Zhang y Z. Jia, «ETMRM: An Energy-efficient Trust Management and Routing Mechanism for SDWSNs, » *Computer Networks*, vol. 139, pa'gs. 119-135, 2018, ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.04.009>.
- [12] S. Skaperas, L. Mamatas y A. Chorti, «Real-Time Video Content Popularity Detection Based on Mean Change Point Analysis, » *IEEE Access*, vol. 7, pa'gs. 142 246-142 260, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2940816.
- [13] G. A. N. Segura, C. B. Margi y A. Chorti, «Understanding the Performance of Software Defined Wireless Sensor Networks Under Denial of Service Attack, » *Open Journal of Internet Of Things (OJIOT)*, 2019, Special Issue: Proc. Int. Workshop Very Large Internet of Things (VLIoT 2019) in conjunction with the VLDB 2019.1

Análisis Comparativo de un Potenciostato de Bajo Costo Basado en Arduino

Comparative Analysis of a Low-Cost Potentiostat based on Arduino

Alejandro Delgado Castro

Sede Regional de Guanacaste, UCR

e-mail: alejandro.delgadocastro@ucr.ac.cr

Código ORCID: 0000-0002-5475-7813

Omar Rojas Bolaños

Sede Regional de Guanacaste, UCR

e-mail: omar.rojas@ucr.ac.cr

Código ORCID: 0000-0001-8876-3181

Palabras clave:

Electroquímica, Electrónica, Potenciostato, Arduino, Celda Fotovoltaica, Voltametría.

Keywords:

Electrochemistry, Electronics, Potentiostat, Arduino, Photovoltaic Cell, Voltammetry.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un potenciostato de bajo costo basado en la plataforma Arduino. El diseño propuesto parte de un sistema similar presentado previamente por otro grupo de investigación, en el cual se detectaron limitaciones en cuanto a la exactitud de los resultados generados en ciertas pruebas electroquímicas. El potenciostato propuesto contempla modificaciones en el circuito electrónico, así como un nuevo programa de control creado en el mismo entorno de desarrollo de Arduino, por lo que se elimina la dependencia del software propietario. El desempeño del equipo presentado se evalúa aplicando una Voltametría de Barrido Lineal (LSV) a una celda fotovoltaica comercial. Los resultados obtenidos con el potenciostato propuesto se comparan con los generados por un equipo profesional. Con ambos equipos se obtuvo voltamogramas similares y una diferencia de aproximadamente 1 mA en la corriente máxima medida.

ABSTRACT

In this work, a low-cost Arduino-based potentiostat is presented. The proposed design is based on a similar system previously presented by another research group, in which a number of limitations associated with the accuracy of its results were detected for some electrochemical tests. The proposed potentiostat contemplates modifications in the electronic circuit, as well as a new control program created in the same Arduino development environment, thus eliminating its dependency on proprietary software. The performance of the presented equipment is evaluated by applying a Linear Sweep Voltammetry (LSV) to a commercial

photovoltaic cell. The results obtained with the proposed potentiostat are compared with those generated by a professional equipment. In both cases, similar voltammograms are obtained and a difference of approximately 1 mA is observed in the maximum current measured.

I. INTRODUCCIÓN

Debido a su uso extensivo en el campo de la electroquímica y a sus elevados precios, en los últimos años se ha publicado una cantidad importante de artículos científicos con diferentes propuestas para la construcción de potenciostatos basados en la plataforma Arduino. Una de las primeras propuestas de este tipo fue publicada por Meloni [1] quien reportó la construcción de un potenciostato con un rango de medición de ± 1 V y ± 1 mA. Por su parte, Joshi y Sutrave [2] construyeron un potenciostato para la realización de voltametrías cíclicas. Cordova-Huaman et. al. [3] publicaron la construcción de un potenciostato basado en un Arduino NANO y operado desde un teléfono celular. Así también Farhan et. al. [4] presentaron la construcción de un potenciostato para utilizarlo en la determinación de etanol. Un aporte importante en la temática lo realizaron Li et. al. [5] quienes presentaron un sistema basado en Arduino UNO, alimentado por una única fuente de voltaje positiva, al cual denominaron potenciostato JUAMI. Los autores proporcionaron suficientes detalles sobre la construcción del equipo y brindaron un programa para su control, escrito en LabView. En investigaciones previas realizadas por este grupo de investigación, se detectaron problemas en el diseño del protenciostato JUAMI, que afectan la exactitud de los resultados generados cuando este es utilizado en ciertas pruebas electroquímicas. Específicamente, el equipo presenta problemas para fijar un voltaje de celda deseado, y para medir la corriente de celda con exactitud.

En este trabajo se presentan las modificaciones realizadas al potenciostato JUAMI, que abarcan cambios en el circuito de control y la sustitución del programa en LabView por uno propio, escrito en el entorno de desarrollo de Arduino. En el circuito propuesto (ver Figura 1), se eliminaron cuatro resistencias de $68\ \Omega$ que originalmente se encontraban conectadas de la siguiente manera: entre la salida del amplificador operacional A y el electrodo Contador (CE), entre el electrodo de Trabajo (WE) y la entrada inversora del amplificador operacional C, entre la terminal A0 y su correspondiente entrada analógica en el Arduino, y entre la terminal A1 y su correspondiente entrada analógica en el Arduino. Se observó que estas resistencias generaban diferencias de potencial indeseadas que impedían fijar el voltaje de celda adecuadamente, sobre todo a corrientes de celda superiores a 1 mA. En relación con el software de control, se creó un nuevo programa que permite definir de mejor manera el voltaje de celda aplicado y la velocidad de barrido deseada. Así mismo, el nuevo programa permite medir el voltaje de celda y la corriente de celda con mayor exactitud, mediante el uso de curvas de calibración.

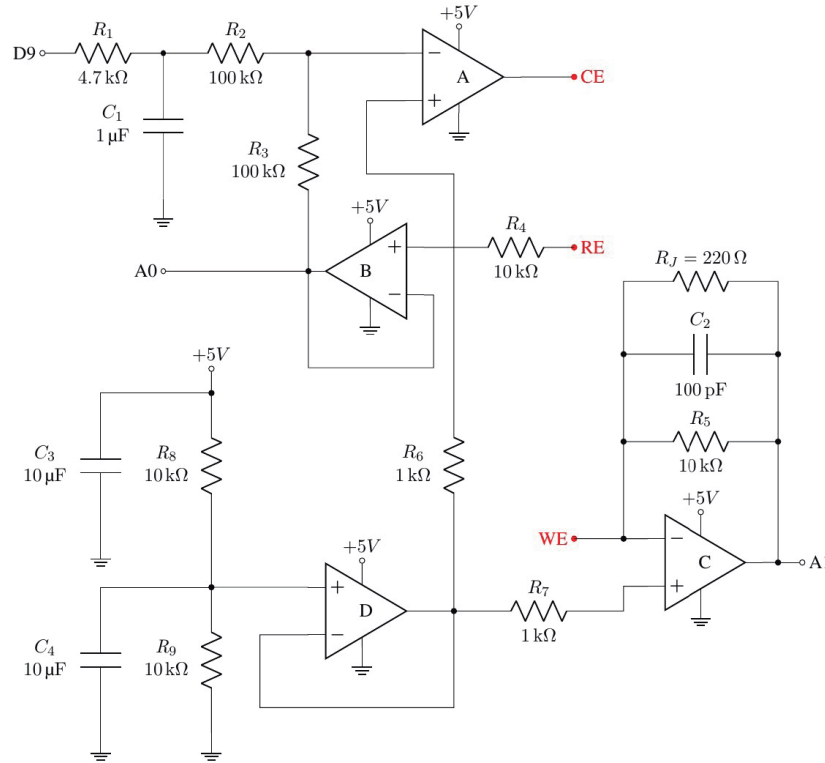


Fig 1. Diagrama electrónico del circuito de control propuesto

Para evaluar el desempeño del potencióstato modificado, se realiza una Voltimetría de Barrido Lineal (LSV) para caracterizar una celda fotovoltaica comercial. Esta prueba presenta dos características que la hacen interesante como criterio de evaluación. Primero, la celda fotovoltaica representa una carga activa que puede entregar energía al potencióstato. Por otro lado, la velocidad de barrido utilizada implica reducir el número de datos que se promedian entre cada valor de ancho de pulso, lo que de acuerdo a estudios previos realizados por este grupo de investigación, podría tener consecuencias en las lecturas de corriente. Los resultados obtenidos con el potencióstato propuesto se comparan con los generados por un equipo profesional.

II. METODOLOGÍA

A. Calibración del potencióstato JUAMI modificado

Se conecta una resistencia de carbón de $5.1 \text{ k}\Omega$ (R_L) entre los electrodos Contador (CE) y Trabajo (WE) del potencióstato, mientras que los electrodos de Referencia (RE) y Contador (CE) se conectan al mismo nodo. Se mide el valor real de R_L con un ohmímetro y se registra dicho valor. El voltaje en R_L se mide con un voltímetro, con su terminal positiva conectada al electrodo de Trabajo (WE), y se ejecuta el programa de ajuste. Por medio de la terminal D9, el programa aplica durante algunos segundos una señal PWM con anchos de pulso entre 0 y 255 (valor de PWM), en intervalos

de 17 unidades. El voltímetro registrará un valor de voltaje de celda (V_C) distinto para cada valor de PWM asignado. Se debe registrar manualmente cada uno de estos valores hasta que finalice la ejecución del programa. Posteriormente, se desconecta el voltímetro del sistema y se ejecuta una vez más el programa de ajuste. Los valores registrados en los pines A0 y A1 durante la segunda ejecución del programa, se transfieren a una hoja electrónica y se calculan los valores promedio para cada valor de PWM utilizado. Para cada valor de PWM, se calcula la Corriente de Celda (I_C) utilizando la Ley de Ohm y los valores V_C y R_L . Luego, se construyen las gráficas que se muestran en la Figura 2, y se calculan las rectas de mejor ajuste en cada caso. De esta forma es posible obtener tres ecuaciones: V_C en función del valor de PWM; V_C en función del valor de A0; y valor de A1 en función de I_C . La primera ecuación permite calcular el valor de PWM necesario para aplicar un determinado voltaje de celda. La segunda y la tercera ecuación permiten calcular voltajes de celda y corrientes de celda a partir de los valores de A0 y A1 registrados durante los experimentos electroquímicos.

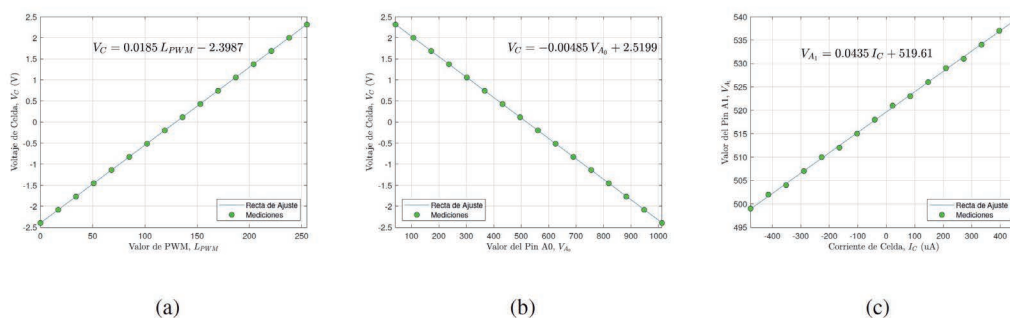


Fig. 2. Curvas de calibración obtenidas para el potencióstato de bajo costo modificado. (a) Voltaje de celda contra valor PWM. (b) Valor de A1 contra corriente de celda. (c) Voltaje de celda contra valor de A0.

B. Sistema de prueba

Las mediciones se realizan a una celda fotovoltaica comercial de 2.0 cm x 4.7 cm, la cual forma parte del kit educativo SOLAR ROVER de la marca GREEN SCIENCE 4M. A cada uno de los terminales (positivo y negativo) de la celda fotovoltaica se le fija un cable utilizando soldadura de estaño. Esta celda se adhiere al fondo de una caja de cartón. Los extremos libres de estos cables se sacan a través de orificios previamente realizados en uno de los costados de la caja. A la tapa de la caja de cartón, en la zona que se encuentra sobre la fotocelda, se le hace un orificio de aproximadamente 8 cm de diámetro para permitir la entrada de luz hacia la fotocelda. Como fuente de luz, se utiliza una lámpara comercial provista de un bombillo LED de 7 W. La altura de la lámpara se ajusta hasta obtener lecturas de corriente y voltaje constantes en el tiempo, las cuales se registran conectando la fotocelda, a una Interfase Universal PASCO 850, provista de un Sensor PS-2115, ambos de la marca Pasco Scientific. La Figura 3 muestra el sistema completo y la fotocelda utilizados.



Fig. 3. Fotografías del sistema de prueba utilizado. (a) Sistema completo. (b) Celda fotovoltaica bajo iluminación

C. Voltametrías de barrido lineal (LSV):

Con la celda fotovoltaica sometida a iluminación, se realizan las pruebas de LSV utilizando el potencióstato JUAMI modificado y un potencióstato profesional PalmSens4. Con ambos equipos, se conectan los electrodos Contador y Referencia al mismo nodo. El electrodo de Referencia se conecta al cable negativo de la celda fotovoltaica mientras que el electrodo de Trabajo se conecta al cable positivo de la misma celda. El barrido se aplica desde un voltaje de 0 V hasta 0.5 V utilizando una velocidad de barrido de 0.100 V s⁻¹. El valor de 0.5 V se seleccionó por ser un valor aproximado del voltaje de celda a circuito abierto (ver Figura 4a). Cada prueba se realiza por triplicado con cada uno de los equipos.

III. RESULTADOS

La Figura 4 muestra las gráficas de voltaje a circuito abierto y corriente de corto circuito en función del tiempo para la celda fotovoltaica utilizada. Las gráficas muestran que el voltaje y la corriente de la celda fotovoltaica se mantienen constantes en el tiempo, por lo que cualquier diferencia entre los resultados emitidos por los potencióstatos utilizados se debe únicamente a diferencias en los equipos y no al sistema de prueba.

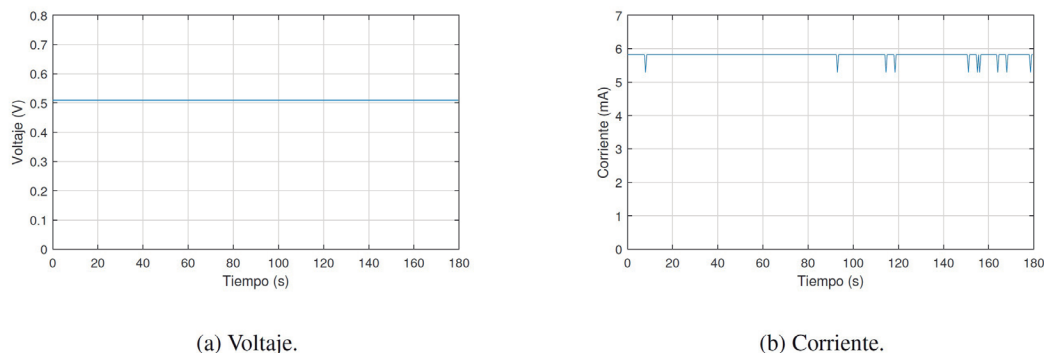
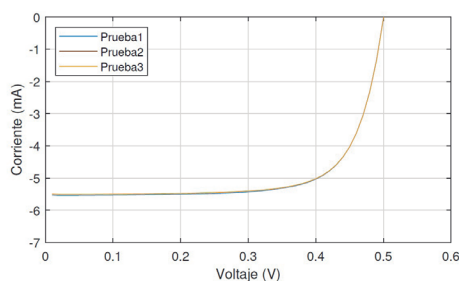
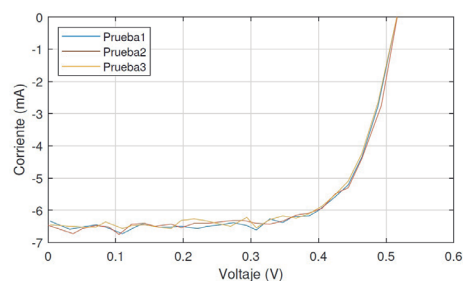


Fig. 4. Curvas de estabilidad de voltaje de circuito abierto y corriente de corto circuito en la celda fotovoltaica seleccionada sometida a iluminación



(a) Potenciostato PalmSens 4.

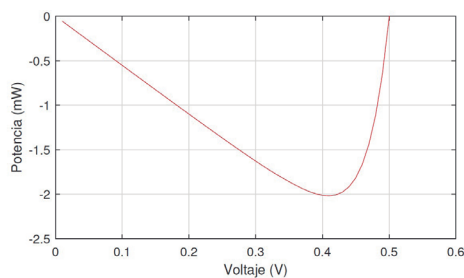


(b) Potenciostato Propuesto.

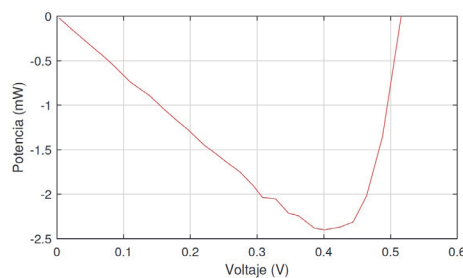
Fig. 5. Curvas de corriente contra voltaje aplicado, generadas mediante el uso de los dos potenciostatos seleccionados, para una velocidad de barrido de 0.100 V s^{-1}

Por otro lado, las curvas de corriente contra voltaje obtenidas luego de aplicar la Voltametría de Barrido Lineal a la celda fotovoltaica, se presentan en la Figura 5, tanto para el potenciostato profesional PalmSens4, como para el potenciostato JUAMI modificado. En ambos casos, las gráficas presentan una forma similar a la reportada para otra celda fotovoltaica [5], sin embargo, los voltamogramas generados por el potenciostato JUAMI presentaron más ruido experimental que los obtenidos con el equipo PalmSens4. Al inicio del barrido, la corriente de celda alcanza su valor máximo y este se mantiene aproximadamente constante hasta que se alcanza un voltaje de celda de aproximadamente 0.4 V. A partir de este punto, la corriente de celda disminuye de manera exponencial hasta alcanzar un valor final de 0 mA, lo cual en teoría ocurre cuando el voltaje aplicado por el potenciostato iguala el voltaje de circuito abierto de la fotocelda.

En la misma Figura 5 se aprecia que el potenciostato JUAMI modificado sobre estima el valor de la corriente que entrega la fotocelda en su valor máximo, registrándose una diferencia de aproximadamente 1 mA con respecto al valor medido por el equipo profesional. Esta diferencia en los resultados podría deberse a las limitaciones propias del amplificador operacional C (ver Figura 1) que actúa como seguidor de corriente, y que se ve afectado por la presencia de ruido en el circuito. Como era de esperar, el equipo profesional registró valores máximos de corriente de celda más cercanos al valor obtenido para la corriente de corto circuito de la fotocelda (ver Figura 4b). Por otro lado, ambos equipos lograron estimar el voltaje a circuito abierto de la celda fotovoltaica, al final de la prueba, bajo las condiciones de iluminación utilizadas, cuyo valor fue de 0.52 V (ver Figura 4a).



(a) Potenciostato PalmSens 4.



(b) Potenciostato Propuesto.

Fig. 6. Curvas de potencia entrega por la fotocelda contra voltaje aplicado, generadas mediante el uso de los dos potenciostatos seleccionados, para una velocidad de barrido de 0.100 V s^{-1}

Las curvas de potencia entregada por la celda fotovoltaica contra voltaje aplicado se presentan en la Figura 6. Ambas gráficas presentan formas muy similares, donde la potencia máxima entregada se alcanza a un voltaje 0.4 V. Nuevamente, el potencióstato JUAMI modificado sobre estima el valor de la potencia máxima entregada, reportándose una diferencia de aproximadamente 0.4 mW entre ambos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un potencióstato de bajo costo basado en un diseño previamente publicado por otro grupo de investigación, en el cual se introdujeron modificaciones para mejorar la exactitud de sus mediciones. El desempeño del equipo propuesto se comparó con el de un potencióstato profesional en una Voltametría de Barrido Lineal aplicada a una celda fotovoltaica. El potencióstato modificado logró reproducir la forma general de la gráfica corriente contra voltaje de la celda fotovoltaica sometida a iluminación. Sin embargo, el equipo sobre estimó el valor de la corriente máxima de celda y sus voltamogramas presentaron más ruido experimental que los obtenidos con el equipo profesional. Por otro lado, el sistema modificado estimó correctamente el voltaje de celda a circuito abierto así como el voltaje en el que la celda fotovoltaica alcanza su máxima potencia. Estos resultados evidencian el potencial del equipo presentado como una alternativa de bajo costo a ser utilizada en laboratorios de enseñanza, o en pruebas preliminares del trabajo investigativo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Sede Regional de Guanacaste de la Universidad de Costa Rica por el apoyo brindado a esta iniciativa de investigación, en particular, por el espacio físico, el equipo, y los materiales utilizados para la realización de las pruebas de laboratorio presentadas en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] G. N. Meloni, Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation, *Journal of Chemical Education*, vol. 93, no. 7, págs. 1320-1322, 2016, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00961>.
- [2] P. S. Joshi y D. S. Sutrave, Building an Arduino based potentiostat and Instrumentation for Cyclic Voltammetry, *JASC: Journal of Applied Science and Computations*, vol. V, n.o XII, págs. 163-167, 2018.
- [3] V. Cordova-Huaman, V. R. Jauja-Ccana y A. La Rosa-Toro, Low-cost smartphone-controlled potentiostat based on Arduino for teaching electrochemistry fundamentals and applications, *Heliyon*, vol. 7, no. 2, págs. 1-7, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06259>.
- [4] M. Farhan, M. N. Aldy, J. Nabillah y F. Adriyanto, Design of Microcontroller-Based Potentiostat for Determination of Ethanol Integrated with Smartphone through Internet of Things, en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1096, 2021.
- [5] Y. C. Li, E. L. Melenbrink, G. J. Cordonier et al., An Easily Fabricated Low-Cost Potentiostat Coupled with User-Friendly Software for Introducing Students to Electrochemical Reactions and Electroanalytical

Techniques, Journal of Chemical Education, vol. 95, n.o 9, p'ags. 1658-1661, 2018, <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00340>.

Educación y Sistemas de Información Geográfica

Centro Experimental de Procesamiento SIRGAS, Universidad de Costa Rica

Experimental Processing Center SIRGAS, University of Costa Rica

Froy Soto Castro

*Estudiante, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: froy.soto@ucr.ac.cr*

Jason Segura Delgado

*Estudiante, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: jason.seguradelgado@ucr.ac.cr*

Betsy Loaiza Jiménez

*Investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: betsy.loaiza@ucr.ac.cr*

Mauricio Varela Sánchez

*Investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: mauricio.varelasanchez@ucr.ac.cr*

Alonso Vega Fernández

*Investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: alonso.vega_f@ucr.ac.cr*

Juan McGregor Sanabria

*Investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: juan.mcgregor@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

GNSS, GAMIT/GLOBK, SIRGAS, geodesia, ODS.

Keywords:

GNSS, GAMIT/GLOBK, SIRGAS, geodesy, ODS.

RESUMEN

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS, por sus siglas en inglés) son constelaciones satelitales que transmiten información que permite calcular la posición de los receptores en tierra. La exactitud del posicionamiento está ligada a la calidad del procesamiento de los datos. Por lo que una forma de garantizar su exactitud es por medio del uso de software científico y el análisis de los resultados, para obtener

información precisa de posición y velocidades de puntos en la superficie terrestre. Estos resultados precisos son utilizados en aplicaciones como el monitoreo de tectónica de placas, determinación de deformación de la corteza terrestre y levantamientos topográficos, así como en la actualización y mantenimiento de sistemas de referencia geodésicos como la red continental SIRGAS, que está comprendida por aproximadamente 500 estaciones GNSS de operación continua con cobertura global. Debido al gran volumen de datos que producen, existen centros de procesamiento encargados de generar soluciones semanales para contribuir al Marco de Referencia Regional y Global, es por ello por lo que se establece un nuevo centro experimental de procesamiento de datos en la Universidad de Costa Rica a partir de mayo del 2024, que trabaja utilizando el software científico GAMIT GLOBK 10.7.1.

ABSTRACT

Global navigation satellite systems (GNSS) are satellite constellations that transmit information that allows the position of receivers on the ground to be calculated. Positioning accuracy is linked to the quality of data processing. Therefore, one way to ensure its accuracy is by using scientific software and analyzing the results to obtain accurate position and velocity information of points on the earth's surface. These accurate results are used in applications such as plate tectonics, crustal deformation determination, and land survey, as well as in the updating and maintenance of geodetic reference systems such as the SIRGAS continental network, which is comprised of approximately 500 continuously operating GNSS stations with global coverage. Due to the large volume of data they produce, there are processing centers in charge of generating weekly solutions to contribute to the Regional and Global Reference Frame, which is why a new experimental data processing center is being established at the University of Costa Rica as of May 2024, working using the scientific software GAMIT GLOBK 10.7.1.

I. INTRODUCCIÓN

Los centros de análisis GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) tienen sus antecedentes en la década de 1980, cuando se comenzó a desarrollar el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) por parte del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Según [1], el GPS fue diseñado inicialmente con fines militares, pero su capacidad para proporcionar posiciones precisas en cualquier lugar del mundo lo convirtió en una herramienta valiosa para aplicaciones civiles, como la navegación, la topografía y la cartografía.

Con la creciente demanda de precisión en la medición de la posición, en la década de 1990 se crearon los primeros centros de análisis GNSS para procesar y analizar los datos de las señales de los satélites de GPS y mejorar la precisión de las mediciones de posición. Estos centros se centran en la investigación y el desarrollo de técnicas de procesamiento de señales GNSS para mejorar la precisión de las mediciones [2].

La importancia de los centros de análisis GNSS se debe a que permiten el procesamiento de datos de múltiples estaciones receptoras, lo que aumenta la precisión y la disponibilidad de las mediciones de posición [3].

Hoy en día, existen numerosos centros de análisis GNSS en todo el mundo, que colaboran entre sí en proyectos internacionales para mejorar la precisión y la disponibilidad de los servicios GNSS

de forma global. De esta manera, los centros de análisis GNSS surgieron como respuesta a la necesidad de mejorar la precisión de la medición de la posición y han evolucionado para convertirse en una parte fundamental del sistema GNSS utilizado en diversas aplicaciones civiles.

El Sistema de Referencia Geodésico para las Américas (SIRGAS) es una red de estaciones GNSS permanente y centros de análisis GNSS que fue establecida en la década de 1990 en América Latina para mejorar la precisión de la medición de la posición en la región. Y surgió como una respuesta a la necesidad de establecer una red geodésica unificada para la región, que permitiera la integración y el intercambio de datos geodésicos entre los diferentes países de América Latina [4]. En la actualidad, SIRGAS es una organización panamericana conformada por agencias gubernamentales regionales de geodesia y cartografía, universidades y centros de investigación, que tiene como objetivo definir y mantener un marco de referencia geocéntrico continental, un sistema de referencia vertical unificado, un modelo de geoide gravimétrico, y una red continental de gravedad absoluta [5].

El primer centro de análisis GNSS de SIRGAS se estableció en Brasil en 1996, seguido por centros en Argentina, Chile, México y otros países de la región. Estos centros de análisis procesan los datos de las estaciones receptoras de SIRGAS y generan productos de alta precisión, como coordenadas geodésicas, velocidades y aceleraciones para la región.

La red SIRGAS se ha expandido y mejorado a lo largo de los años, y hoy en día es una de las redes geodésicas más precisas del mundo, con un error de posicionamiento de aproximadamente 1 cm. Según Drewes et al. [6], la precisión de SIRGAS se debe a la cooperación y colaboración entre los diferentes centros de análisis GNSS en la región, así como a la utilización de técnicas de procesamiento avanzadas y la implementación de estándares internacionales de alta precisión.

SIRGAS actualmente tiene 10 Centros de análisis que son los encargados de generar las soluciones de un conjunto de estaciones que pertenecen a la red de SIRGAS-CON mediante el procesamiento científico de los datos de observaciones GNSS, siguiendo estándares unificados. Además, tiene dos Centros de Combinación, que se encargan de integrar en una solución combinada las soluciones semanales con la solución correspondiente para la red continental SIRGAS-C [7]. Dentro de los aportes, se pueden mencionar la integración de estaciones GNSS al marco de referencia regional e internacional y consolidar su perdurabilidad y estabilidad a través del tiempo [8].

En Costa Rica, se han establecido previamente dos centros de procesamiento de datos SIRGAS; de los cuales uno se encuentra en funcionamiento y pertenece al Instituto Geográfico Nacional [7]. Es importante destacar que ambos centros establecidos previamente, han llevado a cabo sus procesos mediante el uso del software de licencia comercial Bernese, desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna, Suiza. Debido a lo anterior, el uso del software científico GAMIT/ GLOBK para el procesamiento de datos de posicionamiento satelital es novedoso en el contexto nacional.

II. RED DE ESTACIONES SIRGAS

El Sistema de Referencia Geodésico para las Américas (SIRGAS) es un organismo de gran extensión en donde se presenta una red aproximadamente de 500 estaciones GNSS de funcionamiento

continuo con coordenadas de alta precisión (asociadas a una época específica de referencia) y sus cambios a través del tiempo (velocidades de las estaciones). Tal como se muestra en la Figura 1 las mismas en su mayoría se encuentran ubicadas a lo largo del continente americano; sin embargo, existen estaciones ubicadas fuera de América.

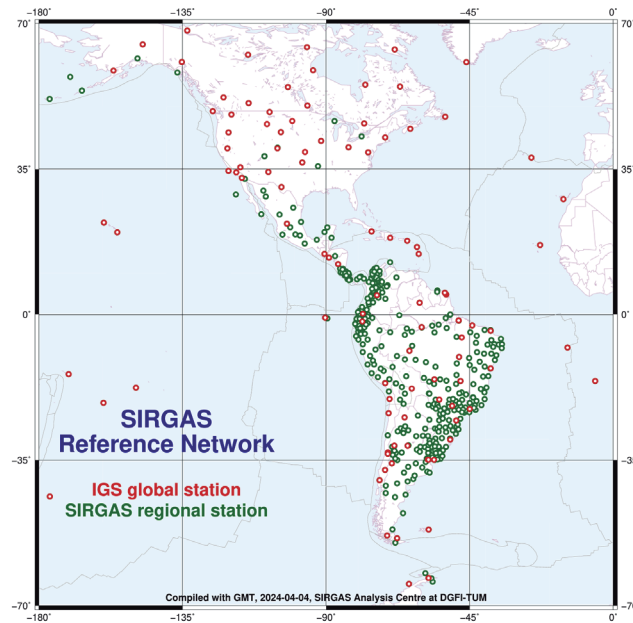


Fig. 1. Estaciones de la Red SIRGAS [5]

Debido a la gran cantidad de estaciones de medición continua que presenta la red, se establecen Centros Locales de Procesamiento SIRGAS; los cuales, adelantan semanalmente el cálculo de un conjunto específico de estaciones SIRGAS, garantizando que cada estación esté incluida en tres soluciones individuales. Sus soluciones son combinadas con la red continental para obtener los productos SIRGAS finales [9].

Así mismo, en [9] se especifica que los centros experimentales de procesamiento son candidatos a convertirse en Centros Locales de Procesamiento SIRGAS. Durante un periodo específico de entrenamiento (en general un año), ellos adecuan sus estrategias de cálculo a las especificaciones SIRGAS y procuran la entrega oportuna y continua de sus soluciones semanales según las indicaciones SIRGAS. Una vez ellos satisfacen los requerimientos dados, son designados como centros de procesamiento oficiales. Durante el periodo de prueba, los Centros Experimentales calculan un conjunto determinado de estaciones SIRGAS, pero sus soluciones no son incluidas en la generación de los productos SIRGAS finales. En [10] se establecen los pasos y trámites generales para el establecimiento de un laboratorio de análisis experimental de SIRGAS. Asimismo, se incluyen los requisitos y aspectos necesarios a considerar para el procesamiento.

III. RELEVANCIA DE UN CENTRO DE PROCESAMIENTO

La Geodesia, y en si la información geoespacial, se han convertido en una herramienta necesaria para la gobernanza a nivel mundial, tanto así que, la Organización de Naciones Unidas (ONU), ha tenido la iniciativa de promover el desarrollo global de la información geoespacial, donde sus prioridades son dirigidas por sus países miembros. Este tipo de información es de vital importancia para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En la resolución A/RES/69/266 “Un Marco de Referencia Geodésico Mundial para el Desarrollo Sostenible” de la ONU permite realizar y apoyar la integración de la información geoespacial que se produce en diferentes niveles para el fortalecimiento de las Infraestructura de Datos Espaciales.

Un componente importante de esta estrategia es la incorporación de personal especializado (científico) y abocado principalmente a las tareas de investigación y sistematización de conocimientos. Es por todo esto que la capacitación de científicos nacionales y en especial de la Universidad de Costa Rica (UCR) es necesaria para contribuir con los ODS y continuar desarrollando educación e investigación de calidad.

En el artículo de la revista GPS World, titulado “The Importance of GNSS Post-Processing for High-Accuracy Mapping and Surveying”, destaca la importancia del post-procesamiento de los datos GNSS para obtener mediciones precisas y fiables en aplicaciones de cartografía y topografía. El artículo señala que el procesamiento de los datos GNSS puede mejorar la precisión de las mediciones hasta en un orden de magnitud, lo que permite obtener resultados más precisos y fiables en aplicaciones como la generación de mapas y la creación de modelos digitales del terreno.

Un centro de procesamiento de datos GNSS es esencial para la obtención de mediciones de alta precisión y para la realización de aplicaciones que requieren información de posición y tiempo. Los sistemas de navegación por satélite GNSS, como el GPS, el GLONASS, el Galileo y el Beidou, están en constante evolución, ofreciendo cada vez mayores niveles de precisión y fiabilidad en sus mediciones. Sin embargo, para obtener los mejores resultados, es necesario procesar los datos GNSS de manera adecuada y eficiente.

IV. METODOLOGÍA PARA EL PROCESAMIENTO

El centro de procesamiento de la UCR utiliza el software científico de procesamiento GAMIT/ GLOBK 10.7.1; el cual corresponde a un conjunto completo de programas para analizar mediciones GNSS. El software ha sido desarrollado por el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), el Instituto Scripps de Oceanografía y la Universidad de Harvard con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias [11]. GAMIT es un grupo de programas para procesar datos de fase de la portadora GNSS con el fin de estimar posiciones relativas tridimensionales de estaciones terrestres y órbitas de satélites, parámetros de orientación de la Tierra y retrasos en el cenit atmosférico. Asimismo, incorpora algoritmos de operador de diferencia que pueden mapear las fases de la portadora en simple y doble diferenciadas, también pueden extraer la información de posicionamiento de datos de fase independiente del número de datos [12]. GAMIT ejecuta el procesamiento

[illegible]

CONCLUSIONES

Gracias a los esfuerzos realizados y los compromisos adquiridos por los encargados del proyecto, así como el apoyo institucional y académico que realiza la Universidad de Costa Rica, se logra la materialización efectiva del Centro Experimental de Procesamiento SIRGAS, Universidad de Costa Rica (UCR) a partir de la semana GPS 2310 (semana del 14 al 20 de mayo del año 2024), generando así soluciones semanales semilibres de más de 90 estaciones. Con esto, se pretende lograr un aporte constante al marco de referencia, permitiendo el monitoreo de movimientos de la corteza terrestre y otros fenómenos naturales. Lo anterior, permite mejorar la planificación, gestión de recursos naturales, entre otros.

Por otro lado, el establecimiento de un centro de procesamiento permitirá la capacitación de estudiantes y científicos en el procesamiento de datos, altamente capacitados en procesos rigurosos para la obtención soluciones de coordenadas de alta precisión.

Además, se demuestra la importancia de los centros de procesamiento y de la geodesia a nivel continental y global, debido a que el continente americano presenta movimientos en la corteza terrestre debido al estar rodeado por el Cinturón de Fuego del Pacífico.

Entre los planes a futuro se tiene lograr la oficialidad del Centro de Procesamiento SIRGAS, lo que permitirá colaborar directamente en el mantenimiento del marco de referencia. Además, generar un traspaso de conocimientos no solo a nivel institucional, sino también a nivel nacional e internacional, con las distintas instituciones y centros de investigación relacionados a SIRGAS. De igual manera, se pretende establecer un grupo de trabajo enfocado en el trabajo en sistemas de alturas, el estudio del campo de gravedad terrestre, y el cálculo de modelos de geopotencial locales y regionales; estableciendo colaboraciones con el Instituto Geográfico Nacional como parte del convenio de la Universidad de Costa Rica con el Registro Nacional.

Finalmente, se espera que el centro sea generador de múltiples Trabajos Finales de Graduación, y brinde colaboración a otros proyectos de investigación, generando más líneas de investigación novedosas para la Escuela de Ingeniería Topográfica (EIT).

REFERENCIAS

- [1] O. Montenbruck & E. Gill. "Satellite Orbits: Models, Methods and Applications. Springer". 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75064-2>
- [2] A. Leick. "GPS Satellite Surveying", Wiley, 4ta ed, 2015. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/9781119057103>
- [3] C. Rizos & P. J. G. Teunissen. "GPS for Geodesy", Springer, 2da ed, 2015. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319->
- [4] J. C. Rodríguez, D. Gómez & W. Martínez. "El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS). In Taller Regional Sudamericano de Cartografía, Geodesia y Geoinformática", Vol. 3, pp. 1-12, 2010.

- [5] SIRGAS. Disponible en: <https://sirgas.ipgh.org/>
- [6] H. Drewes, L. Sánchez & M. A. Santoyo. “The SIRGAS Reference Frame for Latin America: Achievements and Future Directions. *Journal of Geodetic Science*”, 7(1), 1-10, 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/jogs-2017-0001>
- [7] Sistema de Referencia Geodésico para las Américas. (2021). Informe de gestión, 2021. Disponible en: <https://sirgas.ipgh.org/docs/Boletines/Informe%20de%20gestion%202021.pdf>
- [8] Sistema de Referencia Geodésico para las Américas. (2022b). Procesamiento SIRGAS en DGFI-TUM. Disponible en: Home | SIRGAS Analysis Centre at DGFI-TUM
- [9] “Centros de análisis y combinación – SIRGAS.” <https://sirgas.ipgh.org/red-gnss/centros-de-analisis/>
- [10] J. A. Tarrío, S. Costa, A. da Silva, J. Inzunza, “GUÍA03 DIRECTRICES DE PROCESAMIENTO PARA LOS CENTROS DE ANÁLISIS SIRGAS-CON,” Centro de Análisis SIRGAS, Ref. Guía03, Rev. 3.0, 01-dic-2021. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.35588/dig.g3.2021>.
- [11] “GAMIT/GLOBK.” Disponible en: <http://geoweb.mit.edu/gg/>
- [12] T. A. Herring, R. W. King, and S. C. McClusky, “Introduction to GAMIT/GLOBK,” Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2010.
- [13] J. A. Tarrío Mosquera, “Respuesta Oficio EIT-280-2024 y EIT-281-2024: Propuesta de Instalación de un Centro de Procesamiento Experimental SIRGAS en Universidad de Costa Rica,” dirigido a Sr. M. Varela Sánchez, 3 de abril de 2024

Implementación de prácticas artísticas contemporáneas en la pedagogía de estudiantes de arquitectura

Implementation of contemporary artistic practices in the pedagogy of architecture students

Dr. Manuel Zumbado Retana
Profesor de la Escuela de Arquitectura, UCR
e-mail: manuel.zumbado@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-0093-7146>

Palabras clave:

Pedagogía, landart, arte, arquitectura, stop motion, video mapping, sensibilidad, sensorialidad.

Keywords:

Pedagogy, landart, art, architecture, stop motion, video mapping, sensitivity, sensoriality.

RESUMEN

Este artículo pretende realizar un análisis de la posibilidad de implementar prácticas de otras áreas de conocimiento no exclusivas del área de la ingeniería, para la formación de nuevos profesionales en esta disciplina, Tal es el caso, de utilizar conocimientos provenientes del campo del arte, para promover en los estudiantes de la Escuela de Arquitectura de la facultad de Ingeniería, posibilidades no solamente creativas, sino, también sensibles al asumir conocimientos de la arquitectura en un ámbito de la trans-disciplinariedad con la implementación de ejercicios inspirados en ejes de la contemporaneidad del arte, como son Landart, Stop Motion, Instalación, Arte con luz, Sketch urbano, Video mapping y dibujo plástico, con resultados muy positivos en experiencias edificadoras que acrecientan la sensorialidad del saber arquitectónico en áreas de la contextualización natural, histórica y cultural.

ABSTRACT

This article aims to carry out an analysis of the possibility of implementing practices from other areas of knowledge not exclusive to the area of engineering, for the training of new professionals in this discipline. Such is the case, of using knowledge from the field of art, to promote in the students of the School of Architecture of the Faculty of Engineering, not only creative, but also sensible possibilities of assuming knowledge of architecture in a transdisciplinary field with the implementation of exercises inspired by axes of contemporary art, such as Landart, Stop Motion, installation, art of light, urban Sketch, video mapping and plastic drawing, with very positive results in building experiences that increase the sensoriality of architectural knowledge in areas of natural, historical and cultural contextualization.



Fig. 1. utilización de la luz en clase, foto del autor

I. INTRODUCCIÓN

Históricamente, el ser humano ha hecho uso de diferentes técnicas y manifestaciones artísticas para expresar y comunicar sentimientos, emociones y pensamientos. A lo largo de la historia, el arte es un recurso que se ha utilizado con frecuencia para desarrollar múltiples funciones, entre ellas, como una forma de comunicación y un lenguaje que puede llegar a emocionar a las personas. De este modo, ha sido mediante el arte y dependiendo de la técnica utilizada, podrá entablar una relación con el sujeto en un plano de igualdad, donde las emociones y los mensajes simbólicos constituyen una forma de comunicación a la que todos podemos acceder.

W. Tatarkiewicz, en su libro *Historia de seis ideas Arte*, nos aclara sobre los orígenes del concepto ARTE, “τέχνη (techne) en Grecia, «ars» en Roma y en la Edad Media, a los comienzos de la época moderna, en la época del Renacimiento, significaba destreza, a saber, la destreza que no requería para construir un objeto, una casa, una estatua, un barco, la armazón de una cama, un recipiente, una prenda de vestir, y además la destreza que se requería para mandar también un ejéercicio, para medir un campo, para dominar una audiencia.”[1, p. 39], como podemos apreciar el término “arte” para definir a los artistas es relativamente reciente (del Renacimiento), incluso donde se preciaba más las tareas de la arquitecturas sobre las artes. A través del presente texto, se pretende demostrar que las aproximaciones de las artes contemporáneas a las pedagogías de las escuelas de arquitecturas es la mejor manera de fomentar la formación y el desarrollo del espíritu crítico de futuros profesionales en la arquitectura y posiblemente, la causa de generación de factores más disruptivos en la arquitectura y sus formas, desde una perspectiva de la complejidad.

Es importante para iniciar el planteamiento de este texto, aclarar el origen del concepto de complejidad ya que nos ubica en una amplia estructura epistémica de lo estético y lo cognitivo, para lo cual acudimos el diccionario de la Real Academia Española, La cual define el concepto de complejidad de la siguiente manera “**complejidad**.1.f. Cualidad de complejo. complejo, ja.(Del lat. *complexus*, part. pas. de *complecti*, enlazar). -adj. **Que se compone de elementos diversos**. Conjunto de ideas, emociones y tendencias generalmente asociadas a experiencias del sujeto”. [2]. Desde la perspectiva de Edgar Morin (filósofo y sociólogo francés) se podría decir que el concepto de complejidad se plantea desde un abordaje multidisciplinar y multi referenciada para lograr la construcción del pensamiento que se desarrolla con un análisis profundo de elementos de certeza. Estos elementos se basan en la complejidad que se

caracteriza por tener muchas partes, No el todo como una suma de partes sino como una totalidad que forman un conjunto intrincado y difícil de conocer. Decía Frank Lloyd Wright que las artes más cercanas a la arquitectura eran la música y la pintura. La influencia de otras artes en la arquitectura es indiscutible, y si algo está claro, es que el interés por otras disciplinas de corte artístico, al menos durante el primer año, como es este caso en el taller de Fundamentos de la Arquitectura de nuestra carrera.

A. Contextualización del Arte en la Educación de Arquitectura

Una de las competencias más significativas que debe poseer, actualmente, todos los y las profesionales egresados de arquitectura es la capacidad de proyectar. Está claro que esta tensión significa proyectar en su generalidad; no solo implica proyectar una obra, teniendo en cuenta los conceptos estudiados, como hacer los estudios de lugar, contexto natural y social, el manejo de las herramientas físicas y digitales, sino se desarrolla desde la percepción de la luz en el espacio natural, permitiendo así generar experiencias proyectadas no solo con objetos y entornos figurativos, generando y facilitando el entendimiento sensorial, el correcto uso de los recursos y manejando la intervención en el proceso de construcción, interpreta y ejecuta obras artísticas actualizadas, acrecentando el significado y el disfrute.

Quienes consideran que los y las futuras profesionales de la arquitectura deben estar capacitados para el desarrollo de los procesos de concepción de una obra o de un producto nuevo, ligado al campo de la creación intelectual o artística, y mediante el proceso analítico puede determinar las distintas etapas, actividades y secuencias y relaciones para que un proyecto se ejecute de manera adecuada, teniendo en cuenta múltiples aspectos formales, constructivos, funcionales, económicos y normativos. Siendo el profesional dotado de habilidades comunicativas, con capacidad decisoria, criterio y juicio claro y objetivo en el análisis de los problemas.

Nos dice el teórico finlandés en arquitectura Juhani Pallasma, que “El imaginario mental constituye un vehículo esencial de la percepción, el pensamiento, el lenguaje y la memoria. La imaginación no es tan solo esa capacidad, un tanto frívola, de fantasear, sino que puede considerarse el cimiento de la propia condición humana.”[3, p. introducción]

La necesidad que tiene un o una estudiante de Arquitectura de ampliar su formación mediante diversos talleres, con el fin de que el estudiantado desarrolle habilidades manuales y espaciales, adquiera formación artística, arquitectónica, así como mejorar la capacidad creativa, generadora de futuro y de innovación, potenciando las competencias del futuro egresado en aspectos significativos en el ejercicio profesional de la arquitectura. Uno de los objetivos importantes que de acuerdo a nuestras experiencias desarrolladas desde hace algunos años atrás en nuestra Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica ha sido la posibilidad de generar competencias que van más allá de responder al desarrollo propio de la obra proyectual. Siempre serán producciones de la imaginación y la sensibilidad, extrapolando diferentes detalles no figurativos de diferentes ámbitos con el propósito de afianzar los conocimientos de la estética.

B. El arte como herramienta de apoyo al diseño y la inspiración

La arquitectura está enmarcada dentro del concepto de artes, también está muy ligada a los demás conceptos existentes de artes tales como el de elaborar, diseñar, concebir, interpretar de manera sensible los entornos, los contextos, interpretar materialmente y destrezas, del saber técnico y la habilidad de utilizarlas. La arquitectura, como consecuencia de la relación entre la creación/ la invención y la obra, donde se anexa un concepto criterio sensible de la parte diseñadora. La formación en arquitectura, desde tiempos ancestrales se hacen referencias tipologías arquitectónicas a lo largo de la historia: renacentista, barroco, románico, gótico, clásico, etcétera, correspondiéndolas, como tales, ciertos condicionantes arquitectónicos: cultura clásica, paisajísticos, filosóficos o teóricos, derivados o adjetivos. Extrae también de la naturaleza el entendimiento de sus morfologías para luego aplicarlas a los fundamentos de la forma y del diseño para la base de un determinado marco teórico de entendimiento de la forma y el uso del concepto de su tiempo. “el arte como forma espiritual muere, deberá surgir alguna otra cosa que el sistema prevea como momento sucesivo, estadio de integración más elevada” nos dice Umberto Eco en su libro definición de Arte[4, p. 126].

C. Exploración de Disciplinas Artísticas contemporáneas

La idea del arte como una forma de comunicación ha sido una constante en la historia del arte. Es por esta razón que he querido implementar diferentes corrientes del arte contemporáneo actual a nuestros procesos de aprendizaje, porque he encontrado en ellos, un complemento perfecto o plataforma de desarrollo de destrezas y habilidades para descubrir o llegar a un mejor entendimiento de nuestras capacidades de entender nuestros entornos, contextos o emplazamientos, a través de la implementación de la sensorialidad corpórea total, además de nuestras sensibilidades.

1) LANDART, Aprender del entorno (incluyendo naturaleza y ciudad) a través del patrimonio existente, como capital de experiencia y conocimiento físico.

Para lo cual en años anteriores (2013-2023) hemos implementado la práctica de nuevas corrientes del arte contemporáneo como es la corriente, el arte de la naturaleza en la naturaleza, un arte que debe permanecer donde está, y llegado el momento, **erosionarse o transformarse** como todo en la naturaleza, en trabajos anteriores sometimos a una apuesta en práctica investigaciones en Landart en el espacio físico natural a los estudiantes, para desarrollar campo de investigación visual y directos sobre el paisaje real, generando experiencias sensoriales profundas sobre los aspectos de estudios de sitio de manera directa, donde se despierta una sensibilidad real sobre los objetos de estudio, como en este caso los sitios de emplazamientos de sus propuestas arquitectónicas <https://youtu.be/7anYmrIj15s?si=FGm9swiHQD4oyDdI> [5] https://youtu.be/LkeKcc_NL0c?si=z_u2MLzLeFrUXJxt [6]

Cada vez que se observa la ciudad es el arte contemporáneo el que permite apreciar la ciudad desde una perspectiva diferente, entendiendo mejor el ^{s2}espacio, el de género, el de los autos, transeúntes, vecinos o colectivos en general. La construcción de la inteligencia, de la libertad, de la subjetividad creadora corren en paralelo en esta actividad en el entendimiento de la realidad, desde que comienzan

a brotar posibilidades libres con materiales y elementos encontrados, y también como decía el gran arquitecto norteamericano Louis Isidore Kahn “*entender el sitio para que nos hable de lo que quiere ser*”.

2) STOP MOTION , Planteamos en este caso una práctica basada en la realización de una de las técnicas de animación más antiguas que, en tiempos recientes, una técnica de animación fotograma a fotograma, una de las técnicas más utilizadas por la industria cinematográfica. Hoy las plataformas tecnológicas, nos brindan la posibilidad de implementar la utilización de aplicaciones para nuestros dispositivos celulares, lo cual aprovechamos con la utilización de un App llamado LAPSEIT, el cual nos permitía hacer grabaciones de cuadro a cuadro en grandes lapsos de tiempo de manera accesible y certera. En el caso nuestro lanzamos a los estudiantes al reto de realizar muchos dibujos a mano alzada sobre la ciudad, en uno de los años el estudio de caso fue la Avenida 4 de nuestra ciudad capital, a partir de dibujos realizados en el sitio, un todo trabajo requiere una observación directa para proyectar, eso es, pasear y conocer mejor nuestra ciudad desde diferentes puntos de vista: ver la ciudad a través de ojos urbanos, sociológicos, históricos, artísticos, turísticos y personales. A partir del conocimiento de lo observado, a través de proyectos animados, de cada uno de los lugares visitados que permita conocer el lugar, su historia, sus características, sus articulaciones y cómo cada grupo de estudiantes dio respuesta a los requerimientos de una manera más estética. “STOPMOTION DE AVENIDA 4, SAN JOSE, COSTA RICA | MARZO A ABRIL 2017 | TALLER NEXOS[7] , <https://youtu.be/sOLOibJEZvE?si=0wIKnxrpIJpt06e6>

hacemos evidente las posibilidades de generar espacios pedagógicos utilizando sus propios dispositivos celulares, con diferentes aplicaciones destinadas para estos objetivos. Con resultados más contemporáneos próximos de nuestro tiempo y revistiendo la atención del uso del móvil para fines meramente recreativos, en herramientas fundamentales de aprendizaje.

3) La Instalación, es un género de arte contemporáneo que surge en la década de 1960 en la idea de que la obra se construye en un espacio. La instalación y el arte conceptual como manifestaciones que favorecen la conjunción e interacción de distintos medios y materiales en el contexto de la intervención espacial y sus aplicaciones en la arquitectura, con el fin de llevarlos a la práctica por medio de proyectos individuales sustentados en la libertad expresiva en todos los ámbitos técnicos, espaciales.



Fig. 5. utilización de dispositivos celulares en clase, foto del autor

D) La pintura y el dibujo y Scanner 3D

Implementamos, la exposición teórica y práctica de las técnicas de representación de la forma arquitectónica: sus posibilidades de expresión y manifestación, para incrementar y crear oficio en técnicas de comunicación gráfica de sus ideas. Propiciando un curso es esencialmente la exposición teórica y práctica de las técnicas de representación de la forma arquitectónica. Para lo cual recurrimos a herramientas tradicionales del arte plástico como dibujos a lápiz, al carboncillo, técnica de la acuarela, tiza pastel; Para estas últimas versiones implementamos la utilización de posibilidades de la representación de tres dimensiones, la utilización de aplicaciones para dispositivos móviles, que nos permiten generar escaneos en la tridimensional de maquetas. Qlone, Polycam, Magiscan

E) Video Mapping, como un género con la utilización de proyectores de video para propiciar imágenes sobre superficies no comunes, como edificios u objetos alternativos a las pantallas tradicionales. En este caso propusimos a los estudiantes desarrollar sus propias propuestas audiovisuales (videos) para luego ser proyectadas en un espacio inmersivo en lo posible, en una primera etapa colocando 5 pantallas en forma circular para poder alcanzar una dimensión cercana a los 360° de campo visual y la utilización de algunas aplicaciones tanto para dispositivos celulares, sí como para computadoras, este caso de la aplicación Projection mapper de la marca Optoma, provocando en los estudiantes estados sensoriales más reales y más vividos de los que solamente podríamos lograr en una pantalla de 2 dimensiones.(ver video) [8]. La experiencia sensorial de lo visual aunada de lo auditivo nos llevó a grados en que los aprendizajes tuvieran alcances cercanos en la acción de aprender, a esto nos dice H. Maturana “El aprender tiene que ser algo diferente del captar algo externo, puesto que no se puede dar el captar algo externo, ya que, en la interacción, lo que a uno le pasa, depende de uno.” [9, p. 205].

Con ayuda del Centro Goethe aquí en Costa Rica, logramos: la creación de un Domo, burbuja o espacio inflable, con un diámetro de 5.5 metros y una altura de 4 metros, dicho artefacto se confecciono en una tela sintética blanca, para lograr que ella se convierta en una superficie o pantalla de proyección, este artefacto cuenta con dos cámara inflables para lograr una efectiva posibilidad de ingreso de 5 personas. Con el fin de producir de un evento de carácter pedagógico, en nuestra Escuela de y propiciar experiencias más intensas en los estudiantes a través de su sensorialidad: <https://youtu.be/Q6EY9YEDxeg?si=3UDMiq0wWre8IFrF> [10], pudimos así alcanzar la realización de un evento experimentación visual, utilizando un espacio con capacidad de video proyecciones inmersivas, con capacidad de llegar a tener una experiencia sensorial en un rango de 360 grados visuales, con sonoridades, en el Comedor universitario con estudiantes de primer año de la Escuela de arquitectura.

CONCLUSIONES

Sin lugar a dudas la formación en el ámbito de la creatividad es un tema complejo abierto como arista del conocimiento, con enfoques y dinámicas de creatividad claramente diversas. generando esquemas en que se producen dinámicas de creatividad, la curiosidad, el pensamiento crítico, el

fomento de las ideas. Dice Vigotsky “considero que una obra de arte es “una combinación de símbolos estéticos destinados a suscitar emoción en las personas”.[11, p. 23] Encontrar con esto el momento pedagógico que buscamos incentivar en nuestras prácticas de enseñanza, para conseguir que nuestros futuros profesionales de la arquitectura, no solamente puedan resolver las necesidades básicas de sus objetos de diseño, sino que lo puedan conseguir de una manera más humanizada y trastocada por la sensibilidad. La innovación y creatividad son competencias necesarias en el desempeño de la arquitectura, son elementos fundamentales del perfil profesional, propiciando así una formación más competente para ejercer la profesión. Por tanto, una puesta en valor del proceso de creación de los futuros profesionales, con formación estética y capacidad creativa y la existencia de un diálogo de la arquitectura con otras disciplinas. Las prácticas de arte en los aprendizajes de la arquitectura como elemento de contextualización natural, histórica y cultural, necesarios para comprender el mundo social en que vivimos y actuar sobre él con inteligencia, transformándolo de acuerdo con el principio de compromiso en pro de autorrealización y su relación comunitaria.

Buscamos un camino alternativo de educación cultural y están llamados a desempeñar un papel esencial en la formación del profesional en arquitectura, individuos con una formación humanística-cultural, con un juicio ético-moral sensible, fundamentado y flexible; como lo concibe D. Najmanovich “El pensamiento complejo procede creando “figuras del pensar” que se caracterizan por ser: Producciones de Sentido, Guías Heurísticas- Dispositivos de exploración configurar Cartografías incluyente y dinámicas concebir la cognición como pensamiento-acción-emoción de un sujeto vivo y entramado en interacción multidimensional con su medio”[12, p. 18].

REFERENCIAS

- [1] W. Tatarkiewicz, *Historia de seis ideas Arte, belleza, forma, creatividad, mimesis, experiencia estética*, Sexta. Madrid, España: Editorial Tecnos (Grupo Anaya), 1997.
- [2] R.- ASALE, «Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario», Diccionario de la lengua española. Accedido: 27 de julio de 2016. [En línea]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=XbL0DxO>
- [3] J. Pallasma, *La imangén corporea*. Editorial Gustavo Gili, SL, 2014.
- [4] U. Eco, *La definición del arte*. Barcelona, España: Ediciones Martínez Roca S.A., 1983.
- [5] *Los Negritos LandArt*, (2019). Accedido: 21 de mayo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=7anYmrIj15s>
- [6] *Tárcoles LandArt*, (30 de septiembre de 2016). Accedido: 24 de mayo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=LkeKcc_NL0c
- [7] *STOPMOTION DE AVENIDA 4, SAN JOSE, COSTA RICA / MARZO A ABRIL 2017 / TALLER NEXOS*, (4 de mayo de 2017). Accedido: 22 de mayo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=sOLOibJEZvE>
- [8] *Videoexperiencias Nexos*, (2019). Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=htbN3KcbnuE>
- [9] H. R. Maturana, *El sentido de lo humano*. Santiago, Chile: Ediciones Granica SA, 2008.
- [10] *Proyecto Beuys*, (12 de junio de 2023). Accedido: 22 de mayo de 2024. [En línea Video]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Q6EY9YEDxeg>

- [11] L. S. Vigotsky, *Psicología del arte*. Buenos Aires, Argentina: Paidós, 2006. Accedido: 6 de enero de 2017. [En línea]. Disponible en: https://books.google.co.cr/books/about/Psicolog%C3%ADa_del_arte.html?id=cEGx6_W_rS4C
- [12] D. Najmanovich, «Estética de la complejidad.doc», *Artíc. Present. En El Terc. Semin. Bien. Implicaciones Filosóficas Las Cienc. Complejidad*, 2006.

Novedades estructurales, construcción e inspección

Diseño de compensadores de adelanto de fase para ensayos RTHS

Lead-phase compensators design for RTHS testing

Sergio Lobo Aguilar

Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCR

e-mail: sergio.lobo@ucr.ac.cr

Yi Cheng Liu Kuan

Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UCR

e-mail: yi.liukuan@ucr.ac.cr

Arnoldo Castro Castro

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UCR

e-mail: arnoldo.castrocastro@ucr.ac.cr

José David Rojas Fernández

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UCR

e-mail: jose.rojas_f@ucr.ac.cr

Orlando Arrieta Orozco

Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Facultad de Ingeniería UCR

e-mail: orlando.arrieta@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Compensadores, dinámica, ensayos, filtros, mesas vibratorias, subestructuración, tiempo real.

Keywords:

Compensators, dynamics, filter, real-time, shake tables, substructuring, testing.

RESUMEN

La subestructuración híbrida en tiempo real (RTHS, por sus siglas en inglés) es una técnica de ensayo en donde se combinan sistemas físicos y numéricos para estudiar su interacción dinámica. Al generar un sistema ciber-físico de este tipo, se genera un lazo cerrado en donde podría obtenerse inestabilidad debido a los retrasos en las señales que se generan en sus diferentes componentes. Para subsanar este efecto, en los ensayos RTHS se suele incorporar un compensador en dicho lazo cerrado, y así permitir que el ensayo se ejecute en tiempo real sin que se presente inestabilidad. En este artículo se presenta el proceso de diseño de un compensador inverso para un ensayo RTHS de una estructura de dos niveles, tomando como base un filtro de adelanto de fase. El proceso se realizó de forma iterativa para un sistema de transferencia de mesa vibratoria y para el acelerómetro utilizado, obteniéndose una respuesta estable para un ensayo de vibración libre. Se demuestra cómo el compensador diseñado genera una respuesta del ensayo RTHS en vibración libre similar a la que se obtiene para un ensayo plenamente físico.

ABSTRACT

Real-time Hybrid Substructuring (RHTS) is a testing technique where physical and numerical systems are combined to study their dynamic interaction. By creating such a cyber-physical system, a closed loop is formed, which could lead to instability due to signal delays across its components. To address this issue, compensators are typically integrated into such closed loop in RHTS tests, enabling real-time execution without instability. This article presents the design process of an inverse compensator for a two-level structure RHTS test, based on a phase-lead filter. The process was iteratively conducted for both a shake table transfer system and the utilized accelerometer, resulting in a stable response for a free vibration test. It is demonstrated how the designed compensator yields a RHTS response similar to that obtained in a fully physical.

I. INTRODUCCIÓN

La técnica de ensayo llamada subestructuración híbrida en tiempo real (RHTS, por sus siglas en inglés “*Real-Time Hybrid Substructuring*”) modela físicamente una parte de la estructura en el laboratorio, mientras que la otra se modela numéricamente en un computador. Esta estrategia se suele utilizar cuando la dinámica de una parte del sistema no puede ser capturada con suficiente precisión por un modelo matemático, y no resulta práctico construir un modelo completo de la estructura [1].

Ahora bien, los ensayos RHTS buscan que la estructura completa exhiba un comportamiento dinámico cercano al tiempo real, pero el ciclo de realimentación exhibe un retraso [2]. Este retraso se debe a la dinámica del sistema de transferencia (equipo que genera el movimiento), a los tiempos de comunicación en los procesos de envío, recibimiento, conversión, condicionamiento y preprocesamiento de las señales provenientes de ambos sistemas, y al tiempo que le toma al computador resolver las ecuaciones de la subestructura numérica [3]. De la teoría de control automático, se sabe que el retraso en los lazos de realimentación puede llegar a causar inestabilidad dinámica [4]. A raíz de esta circunstancia, es frecuente que para los ensayos RHTS se necesite diseñar un controlador que compense el retraso inherente del sistema híbrido.

En este artículo se presenta el diseño de un controlador utilizando un filtro de adelanto de fase (FAF) en combinación con sistemas lineales para un ensayo RHTS de una estructura de dos niveles. Se presenta el diseño como alternativa a la estrategia desarrollada por Vanase et. al. [5] para ejecutar el ensayo RHTS en condiciones idénticas, y se muestran los resultados para el caso de vibración libre.

II. CASO DE ESTUDIO

El sistema estructural estudiado se muestra en la Fig. 1a. Consta de columnas de aluminio, que se atornillaron a plataformas de fibra de vidrio, con las dimensiones mostradas. Sobre las plataformas se instalaron dispositivos AMD (“*Active Mass Dampers*”), los cuales fueron utilizados como masas pasivas en este caso. El conjunto, a su vez, se montó sobre una mesa vibratoria tipo “*Shake Table II*”. El fabricante de todo el equipo es la compañía *Quanser Inc.*

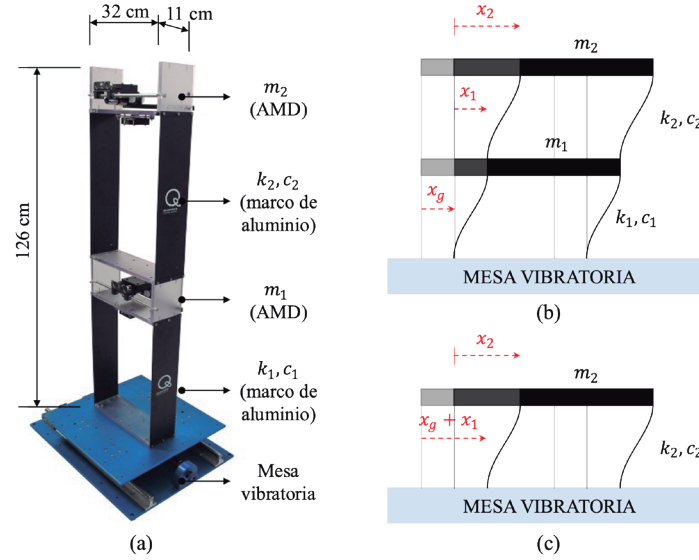


Fig. 1. a) Estructura estudiada b) Modelo plenamente numérico c) Modelo híbrido

Esta estructura puede modelarse como un sistema de dos grados de libertad x_1 y x_2 (Fig. 1b). Si se asumen masas concentradas en cada nivel m_1 y m_2 , columnas de rigidez k_1 y k_2 y amortiguamiento c_1 y c_2 , y que el sistema sufre desplazamientos en la base x_g , se puede escribir

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

donde las velocidades y aceleraciones relativas a la base de cada nivel son $\dot{x}_1$, $\dot{x}_2$, $\ddot{x}_1$ y $\ddot{x}_2$, y $\ddot{x}_g$ corresponde a la aceleración de la base.

Ahora bien, en este estudio se modeló físicamente el segundo nivel, y numéricamente el primer nivel (Fig. 1c), a través de modelos de espacios de estado. Considerando que el cortante del segundo nivel es $V_{s2} = c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1)$, se definió un vector de estado $Z_1 = [x_1 \quad \dot{x}_1]^T$, un vector de entrada $U_1 = [\ddot{x}_g \quad V_{s2}]^T$ y un vector de salida $Y_1 = [x_1 \quad \dot{x}_1^a]^T$, con lo cual se obtiene

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1/m_1 & -c_1/m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 1/m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ V_{s2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \ddot{x}_1^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1/m_1 & -c_1/m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1/m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ V_{s2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

En este planteo, la subestructura numérica requiere conocer la aceleración en la base junto con el cortante que se transmite del primer piso hacia el segundo, V_{s2} . Este cortante no se mide

directamente, sino que se usa la aceleración medida por el acelerómetro, y se multiplica por la masa m_2 para obtener la fuerza. Para más detalles, se recomienda al lector referirse a Vanase et. al. [5]. El modelo numérico se creó en MATLAB® y se alimentó a *Simulink*, que a su vez se comunica con la mesa a través de módulos de *Quanser*.

II. DISEÑO DE LOS COMPENSADORES PARA EL ENSAYO RHTS

A. Diseño inicial del compensador de la mesa vibratoria

El diseño realizado siguió la teoría descrita por [3]. En primer lugar, se obtuvo la función de transferencia (FT) experimental de la mesa vibratoria a través del método de espectros cruzados, utilizando secuencias de ruido creadas en MATLAB®, de distribución uniforme y 400 segundos de duración, a las cuales se les aplicó un filtro paso bajo tipo “*Butterworth*” de orden 10 y frecuencia de corte de 8 Hz.

Seguidamente, se calibró un modelo numérico de la inversa de la FT experimental, utilizando un FAF de base. Este tipo de filtro “adelanta” una señal en el tiempo, pero aumenta su magnitud conforme se aumenta la frecuencia. Para contrarrestar ese crecimiento, se puede convolucionar el FAF con su propia inversa de primer orden. Por lo tanto, el modelo utilizado tiene la forma

$$C_{lead, compuesto}(s) = \frac{1+(a \cdot T)s}{1+Ts} \frac{1+T_1s}{1+(a_1 T_1)s} \quad (4)$$

donde s es la variable compleja de Laplace, T y T_1 son parámetros de retraso a definir, y a y a_1 son parámetros a determinar. Ahora bien, este filtro resulta insuficiente para ajustar la FT experimental, por lo que se pueden convolucionar sistemas adicionales. En este caso, se utilizó un sistema compuesto dado por

$$C_1(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \frac{s^2 + 2\xi_1\omega_{n1}s + \omega_{n1}^2}{\omega_{n1}^2} \quad (5)$$

donde ω_n , ω_{n1} , ξ y ξ_1 son parámetros que emulan sistemas de un grado de libertad (GDL) e inversos. Se escogió este formato ya que garantiza que el compensador obtenido sea de fase mínima [3]. Así, por medio de un proceso iterativo, se calibraron los valores iniciales mostrados en el Cuadro I.

Ahora bien, al ejecutar ensayos RHTS de vibración libre, se observó inestabilidad, a pesar de haber implementado el compensador diseñado. Entonces, bajo la sospecha de que existía un retraso adicional debido al sistema de adquisición de la señal de aceleración, se determinó una FT con el desplazamiento como entrada y aceleración como salida, y se encontró que el sensor

añade un retraso de aproximadamente 10 ms. A raíz de este resultado, se procedió a diseñar un compensador para el acelerómetro, como se describe a continuación.

B. Diseño del compensador del acelerómetro y ajuste del compensador de la mesa vibratoria

El diseño del compensador del acelerómetro se realizó mediante una técnica similar a la explicada para el caso de la mesa vibratoria. No obstante, en esta ocasión el filtro se convolucionó con un sistema de un orden mayor, porque debe mantener una amplitud cercana a la unidad por debajo de los 8 Hz y evitar amplificación del ruido del sensor en frecuencias mayores, el cual es de tipo MEMS de bajo costo [6]. Adicionalmente, este tipo de sensor dificulta la introducción de un filtro paso bajo, porque este introduce más retraso en la señal. De esta forma, se utilizó un FAF y su inversa con 2 pares de sistemas de un GDL e inversos. Se eligió amplificar alrededor de los 9.5 Hz ya que este valor está fuera del rango de operación de interés y, además, no se introduce mayor ganancia a altas frecuencias. El diseño final se logró de forma iterativa, en combinación con ajustes sucesivos a la compensación de la mesa vibratoria hasta que la simulación híbrida llegue a ser estable, obteniéndose los parámetros mostrados para el acelerómetro y la mesa (diseño final) en el Cuadro I.

CUADRO I
PARÁMETROS DE LOS COMPENSADORES DISEÑADOS

Parámetro	Mesa vibratoria		Acelerómetro
	Inicial	Final	
T	0.005	0.016	0.015
a	4	4.92	2.2
T_I	0.015	0.025	0.0045
a_1	1.2	3.6	4.7
ω	17	30	8.5
ξ	0.55	0.47	0.28
ω_1	35	30	35
ξ_1	0.4	0.3	0.003
ω_2	--	--	9.5
ξ_2	--	--	0.05
ω_3	--	--	70
ξ_3	--	--	0.3

Este proceso de calibración iterativa de la mesa y el sensor, se dio en conjunto con la observación de que, con el diseño inicial de la mesa, el equipo emitía sonidos de alta frecuencia. Mediante múltiples ensayos experimentales, se determinó que estos sonidos aumentaban si se trataba de compensar una fase mayor, y disminuían en caso contrario. También se apreció una mayor fluidez en

el movimiento del equipo y que mejorar la estabilidad del sistema. En otras palabras, se determinó que el diseño original causó una sobre-compensación del retraso.

Una posible razón por la que el atraso real de la mesa vibratoria es mucho menor que el identificado es debido a que el equipo *Quanser* y el computador utilizado no son sistemas de “tiempo real”, que son los que se suelen utilizar para ensayos RTHS. Se considera plausible que la adquisición y transmisión de las mediciones de desplazamiento de la mesa son los responsables en añadir retrasos no cuantificados. Por lo tanto, la estabilidad se logró a partir de un proceso de prueba y error para la búsqueda de los parámetros de las FT descritas anteriormente.

III. RESULTADOS DEL ENSAYO RTHS

Una vez que se observó que el compensador proveía estabilidad al sistema, se procedió a ejecutar un ensayo de vibración libre RTHS. Este ensayo consistió en excitar manualmente la subestructura física con una frecuencia cercana a la natural del primer modo hasta llegar a una amplitud razonable, para permitir luego que se presentara la vibración libre. Cabe destacar que, durante la ejecución de este ensayo, se le comandó a la mesa una señal nula, con el objetivo de simular la condición de base fija. Además, con el fin de obtener una referencia experimental para evaluar el desempeño de la prueba RTHS, se efectuó un ensayo en cual la estructura de dos niveles se modeló físicamente y se excitó en forma similar al caso híbrido. En ambos casos, el movimiento se registró por medio de extensómetros láser (en el caso de RTHS el primer nivel correspondiendo a la mesa vibratoria) y con un sistema de adquisición de datos externo *CompactDAQ* de *National Instruments*, a una tasa de muestreo de 100 Hz.

La comparación de la historia de vibración libre del modo fundamental se muestra en la Fig. 2 para ambos niveles. En primera instancia, se puede apreciar que la simulación híbrida es estable en el tiempo y concuerda en términos de frecuencias, lo cual demuestra un buen desempeño del compensador basado en el FAF. También se observa que ambas pruebas tienden a converger en términos de la atenuación de la amplitud conforme se aumenta el tiempo de vibración libre, aunque el amortiguamiento es menor para los primeros ciclos de vibración de la prueba híbrida. Para mejorar este resultado, se requiere estudiar y afinar nuevas combinaciones de los parámetros utilizados para el diseño del compensador. Por último, se aprecia que existen diferencias en las amplitudes iniciales de la vibración libre. Esto se debe a que, como se mencionó, la generación del movimiento se realizó en forma manual. Además, para realizar el ensayo RTHS se desarmó la estructura y se colocó solo el segundo nivel sobre la mesa vibratoria, por lo que las pruebas de vibración libre se tuvieron que realizar por separado.

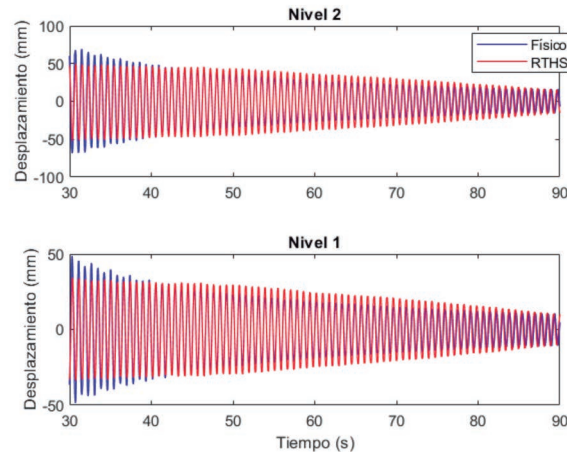


Fig 2. Comparación de los resultados de un ensayo plenamente físico con un ensayo RTHS

CONCLUSIONES

El estudio presentado demostró que la estrategia de diseño de un compensador inverso basado en un filtro de adelanto de fase es útil para proveer estabilidad en un ensayo RTHS, aun cuando el equipo utilizado para el mismo ofrece mayores dificultades que los que se suelen utilizar en este tipo de pruebas. Se mostró que el sistema de transferencia utilizado exhibe una dinámica significativamente diferente a la que se puede obtener mediante el método de espectros cruzados, por lo cual se puede recurrir a un proceso iterativo de prueba y error para diseñar un compensador en estas condiciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, por su colaboración y acceso al equipo necesario para el desarrollo del estudio. Se agradece además el apoyo recibido en el marco de los proyectos de investigación 321-C3-151 y 731-B9-265, inscritos en la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS

- [1] R. Christenson, Y. Z. Lin, A. Emmons and B. Bass, "Large-Scale Experimental Verification of Semiactive Control through Real-Time Hybrid Simulation," *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 4, pp. 522-534, 2008.
- [2] J. Carrion, B. Spencer Jr and B. Phillips, "Real-time hybrid simulation for structural control performance assessment," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 8, no. 4, pp. 481-492, 2009.
- [3] R. M. Botelho, "Real-time hybrid substructuring for marine applications of vibration control and structural acoustics," 2015.
- [4] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Pearson Educación, 2003.

- [5] D. Vanasse III, S. Lobo-Aguilar and R. Christenson, “Real-Time Hybrid Substructuring Using an Inertial Shaker Transfer System,” in *Society for Experimental Mechanics Annual Conference and Exposition*, 2023.
- [6] “Shake Table II and 2xAMD-1 User Manual,” Ontario, 2015.

Ruido sísmico y actividad antropogénica: caso de estudio de un edificio alto durante la pandemia

Seismic noise and anthropogenic activity: case study of a tall building during the pandemic

Yi Cheng Liu Kuan

Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: yi.liukuan@ucr.ac.cr

Diego Hidalgo Leiva

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: diego.hidalgoleiva@ucr.ac.cr

Palabras clave:

COVID-19, dinámica de estructuras, monitoreo de largo plazo, ruido sísmico, vibración ambiental.

Keywords:

Ambient vibrations, COVID-19, long-term monitoring, seismic noise, structure dynamics.

RESUMEN

Un monitoreo de largo plazo de vibraciones ambientales fue realizado en el edificio Uno de Torres Paseo Colón, ubicado en San José, Costa Rica, con el fin de analizar la variación temporal de los parámetros dinámicos del edificio. Esto fue implementado mediante 5 acelerógrafos triaxiales instalados en diferentes niveles, y registrando bloques de datos de 10 minutos por cada hora desde el 8 de mayo del 2020 hasta 8 de enero de 2022, periodo en el que ocurrió la pandemia de COVID-19 donde debido a las severas medidas de confinamiento tanto a nivel mundial como en Costa Rica, se ha reportado reducción del ruido sísmico. Mediante un análisis de la media cuadrática de los bloques de aceleraciones registradas, se observaron patrones de variación horarias que difieren entre los días de entresemana, sábados y domingos, relacionados con las rutinas diarias en un centro urbano. Asimismo, se evidencia variación en amplitud de aceleración durante las distintas etapas de la pandemia y las diferentes medidas de restricción de movilidad, hecho que sugiere que el ruido sísmico en edificaciones de centros urbanos es generado, en gran medida, por las actividades antropogénicas.

ABSTRACT

Long-term monitoring of ambient vibrations was carried out in the building one of “Torres Paseo Colón”, located in San José, Costa Rica, in order to analyze the temporal variation of the dynamic parameters of the building. This was implemented using 5 triaxial accelerographs installed at different levels, and recording data blocks of 10 minutes for every hour from May 8th, 2020 to January 8th, 2022, the period just when the COVID-19 pandemic occurred and during which reduction in seismic noise has been reported due to severe

confinement measures worldwide and also in Costa Rica. Through an analysis of the root mean square of the recorded block accelerations, hourly variation patterns were observed, which differ between weekdays, Saturdays and Sundays, related to daily routines in an urban center. Likewise, variation in acceleration amplitude is evident during the different stages of the pandemic under different mobility restriction measures, a fact that suggests that seismic noise in buildings in urban centers is generated, to a large extent, by anthropogenic activities.

I. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la vibración ambiental o el ruido sísmico que experimenta el suelo y los edificios ha servido para múltiples propósitos como para la caracterización dinámica de diferentes suelos [1] y de edificios [2], [3], el análisis post-eventos sísmicos que permite evaluar el impacto sísmico y la salud o seguridad estructural [4], e incluso, para la evaluación de la calidad de vida de los habitantes [5]. Desde el año 2020 cuando inició la pandemia de COVID-19, se publicaron numerosos estudios sobre la significativa reducción en el ruido sísmico captado por estaciones sismológicas tanto a nivel mundial [6]-[9] como en Costa Rica [10] debido a la imposición de medidas de confinamiento que restringían la movilidad para contener la propagación epidémica. Este hecho evidencia la íntima correlación entre las actividades antropogénicas y el ruido sísmico o vibración ambiental donde incluso, hay estudios que propone utilizar este último parámetro como indicador del nivel de aislamiento que experimentan las comunidades durante la pandemia [7].

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LIS-UCR) tiene bajo su dominio una amplia red de estaciones acelerográficas que monitorean datos de aceleración tanto en campo libre como edificios de gran altura o de importancia a lo largo de todo el país. Dentro de la mencionada red, se tiene al edificio Uno de Torres Paseo Colón, ubicado en San José, el cual hasta hace poco era el edificio más alto de Costa Rica y al cual se le realizó monitoreo de largo plazo desde el 8 de mayo del 2020 hasta el 8 de enero de 2022, periodo justo en el que ocurrió la pandemia de COVID-19. Resulta interesante analizar la variación de la amplitud del ruido sísmico durante diferentes etapas de la pandemia en Costa Rica versus los diferentes niveles de alerta y restricción de movilidad como medidas de control epidemiológico, así como para detectar patrones de variación horaria y su correlación con actividades antropogénicas.

II. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO, LA INSTRUMENTACIÓN Y EL PROCESAMIENTO DE DATOS DE MONITOREO A LARGO PLAZO

El edificio uno de “Torres Paseo Colón” es uno de los 3 edificios que conforman el “Complejo Torres Paseo Colón” como se ilustra en la Fig. 1 a), los cuales son condominios de uso mixto: comercios, oficinas y residencial, situado sobre avenida Paseo Colón de San José, entre las calles 28 y 24, y está compuesto por 2 torres principales: la Torre Uno con 27 pisos de oficinas y apartamentos, Torre Dos con 29 niveles, y un edificio de parqueos y de amenidades de 9 nivel que las une, pero desligadas a nivel estructural de modo que no interactúan entre sí.

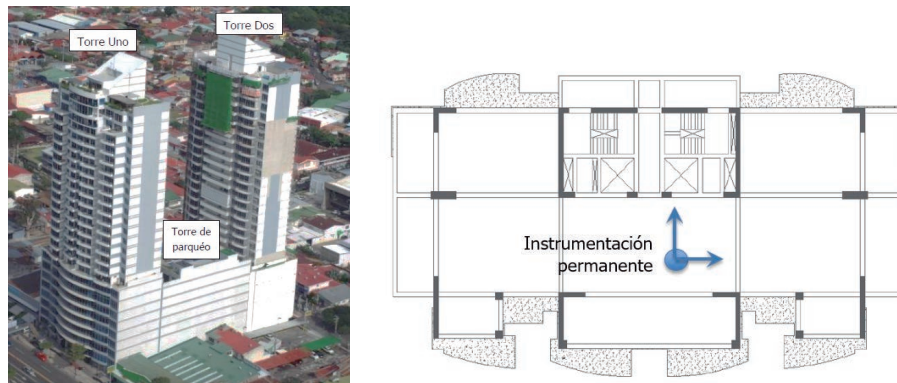


Fig. 1. a) Complejo Torres Paseo Colón, b) distribución de la planta típica. Fuente: [11]

La ubicación en planta de los 5 acelerógrafos digitales triaxiales que conforman el sistema de instrumentación permanente se muestra en la Fig. 1 b), y en altura se encuentran en la base al nivel de la calle, en el nivel 7, nivel 15, nivel 21 y por último nivel 29 que es en la azotea. Estos son de marca Reftek modelo 130-SMA, los cuales son de sistemas microelectromecánicos micro mecanizados (MEMS por sus siglas en inglés), con una sensibilidad de 2,5 V/g, un nivel de clip de 4g y un rango dinámico mayor a 155 dB. Estos registran el movimiento en aceleración en tiempo real y de manera continua.

Con el monitoreo a largo plazo realizado, se registraron bloques de datos de 10 minutos por cada hora desde el 8 de mayo del 2020 hasta 8 de enero de 2022. Los datos crudos fueron procesados en MATLAB con corrección de línea base, escalamiento y conversión de unidad de cuentas eléctricas a gales, un filtrado paso alto con una frecuencia de corte de 0,1 Hz para remover algunas fluctuaciones o ruido eléctrico remanentes de largo periodo. Luego, se estimaron diversos parámetros de caracterización dinámica a los bloques de datos sincronizados y formados por los 10 canales de medición en el plano horizontal (de los 5 acelerógrafos), tales como la media cuadrática promedio de aceleración en los respectivos 5 niveles instrumentados (para un rango de frecuencia hasta los 20 Hz) y el análisis espectral mediante el método de descomposición en el dominio de frecuencias (FDD, por sus siglas en inglés de “Frequency Domain Decomposition”) [12]. Este último permite resumir la información espectral contenida en múltiples canales de medición en un solo gráfico de valores singulares, entre otros. Este mismo análisis también fue realizado para los otros 5 canales en dirección vertical.

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dado que el monitoreo de largo plazo fue realizado en tiempos de pandemia cuando se implementaron diversas medidas de restricción de movilidad para el control epidemiológico, la variación temporal de los parámetros dinámicos fue examinado y contrastado minuciosamente con las diferentes medidas implementadas por las autoridades sanitarias. Al final, se agruparon 9 etapas de análisis con base en la evolución pandémica, el sentido común y la variación de la media cuadrática de la aceleración, las cuales se muestran en el CUADRO I. Cabe mencionar que la variación de las medidas tomadas

por las autoridades durante la pandemia fue sumamente compleja, por lo que no todas las medidas y ni sus correspondientes periodos fueron contempladas y detalladas en esta investigación, tomando únicamente las mejor documentadas o las de mayor impacto en la movilidad de la población.

CUADRO I
ETAPAS AGRUPADAS PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA MEDIA
CUADRÁTICA DE ACELERACIÓN CON LA EVOLUCIÓN PANDÉMICA
Y MEDIDAS DE CONTROL EPIDEMIOLÓGICO

<i>Año</i>	<i>Etapas</i>	<i>Fecha</i>	<i>Restricción vehicular*</i>	<i>Otras medidas de control**</i>
2020	1- <i>Alerta amarilla</i>	16 de mayo a 2 de julio	Entre semana: 10 p.m. a 5 a.m. Fin de semana: 7 p.m. a 5 a.m.	Reducción de aforo al 50% en los negocios
	2- <i>Alerta naranja</i>	3 de julio a 9 de agosto	7 p.m. a 5 a.m. todos los días	Plan básico de funcionamiento y teletrabajo
	3- <i>Cerco epidemiológico</i>	11 a 19 de julio (incluidos los fines de semana anterior y posterior)	Entre semana: restricción vehicular total Fin de semana: 5 p.m. a 5 a.m.	Cierre de establecimientos de manera total por 5 días. Acceso solo a establecimientos autorizados
	4- <i>Fase de cierre (después de la primera reapertura en agosto)</i>	10 a 21 de agosto	5 p.m. a 5 a.m. todos los días La circulación por placas se restringe a un día entre semana y un día en fin de semana	Acceso solo a establecimientos autorizados
	5- <i>Fase de reapertura controlada (I)</i>	9 de setiembre a 31 de octubre	Entre semana: 10 p.m. a 5 a.m. Fin de semana: 8 p.m. a 5 a.m.	La mayoría de negocios ya pueden funcionar excepto las actividades masivas. Desde 8 de octubre se permite bares, casinos y eventos religiosos operar a 50% de aforo
	6- <i>Fase de reapertura controlada (II)</i>	1 de noviembre a 30 de diciembre	Entre semana: 10 p.m. a 5 a.m. Fin de semana: 9 p.m. a 5 a.m.	Se elimina la restricción por placas fines de semana en esta fase
2021	7- <i>Mayo a agosto</i>	27 de abril a 31 de agosto	5 a.m. a 9 p.m. todos los días 5 a.m. a 10 p.m. desde agosto	Se habilitó aforos diferenciados a establecimientos de mayor afluencia
	8- <i>Setiembre a octubre</i>	1 de setiembre a 31 de octubre	5 a.m. a 9 p.m. todos los días excepto las primeras 2 semanas que es de 5 a.m. a 10 p.m.	Aumento de aforos a establecimientos de mayor afluencia
	9- <i>Noviembre a diciembre</i>	1 de noviembre a 30 de diciembre	5 a.m. a 10 p.m. todos los días excepto las primeras 2 semanas que es de 5 a.m. a 9 p.m.	Apertura a eventos masivos con 40% de aforo en diciembre

* A menos que se indique otro, siempre se tiene restricción vehicular por placas de 1 día entre semana y 1 día fin de semana.

** Las medidas de control se mantienen desde su pronunciamiento y va sumando a lo largo del tiempo a menos que se indique otro.

A. Patrones de variación horaria, comparando días de entresemana, sábados y domingos

Se ha detectado un patrón repetitivo de variación horaria de amplitud de aceleración a lo largo de los días a partir de un análisis cualitativo de la variación horaria y diaria de la media cuadrática de aceleración, así como del espectrograma de FDD que se muestran en Fig. 2 y Fig. 3. En esta última figura se agrupa la variación horaria de los días de entresemana (de lunes a viernes) en las líneas

azules, sábados y domingos en líneas rojas y negras respectivamente, a mano izquierda de la figura; a mano derecha, se muestra la media de las variaciones horarias registradas agrupadas. A pesar de que se cuenta con resultados de los 5 niveles instrumentados, solo se muestran los de la base (nivel 0) y del nivel 21, dado que el patrón es similar en otros niveles.

Se observa en la Fig. 3 que la media cuadrática de aceleración en el nivel 0 (nivel base) del edificio durante horas de la madrugada es aproximadamente 5 veces menor que la de horas pico (7 a.m.) en la mañana de los días de entresemana, y casi 3 veces menor en el nivel 21 del edificio. Esto mismo explica la razón de las franjas de mínima potencia en el espectrograma de FDD de Fig. 2 a), que se repiten diariamente en las horas de la madrugada, hecho que también se evidencia en la Fig. 2 b), donde se compara puntualmente el caso de un espectro FDD de las 2 a.m. y el otro de las 7 a.m. Se nota que en horas de la madrugada la información modal sólo es observable por debajo de los 4 Hz y con una potencia de señal de unos 30 veces menor que a las 7 a.m. para los modos fundamentales, y superior a los 4 Hz prácticamente no se observan crestas claras relacionadas con información modal en horas de la madrugada.

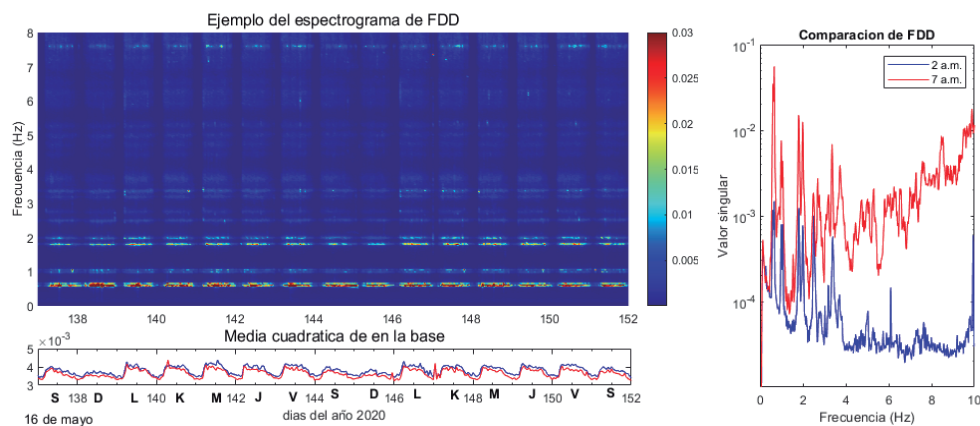


Fig. 2. a) Ejemplo del espectrograma de FDD mostrando la variación horaria y diaria desde el sábado 16 de mayo hasta el 30 de mayo del año 2020 (durante alerta amarilla), b) comparación entre espectros de FDD de horas de la madrugada y hora pico de la mañana

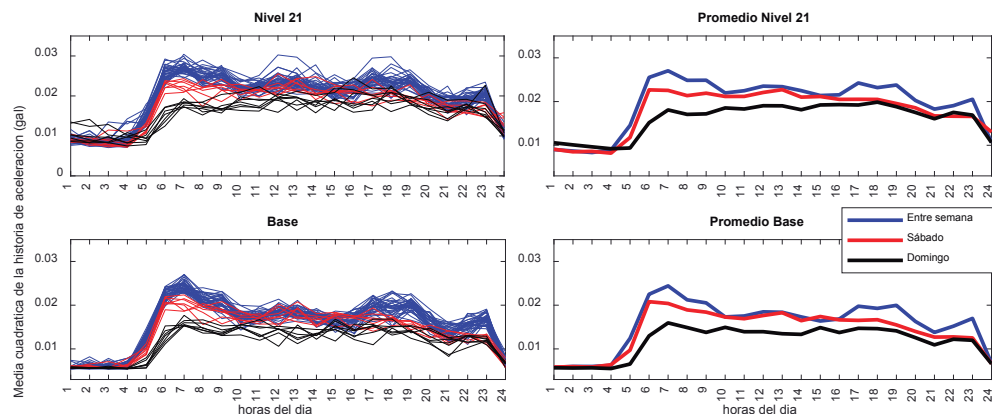


Fig. 3. Ejemplos de variación horaria de la media cuadrática de aceleración de los días de entre semana, sábados y domingos durante la alerta amarilla desde 16 de mayo a 2 de julio de 2020

Otro aspecto por destacar de la Fig. 2 y Fig. 3, es la diferencia del patrón de variación horaria de la media cuadrática de aceleración entre los días de entresemana, sábados y domingos, donde de lunes a viernes el aumento en su magnitud inicia a las 5 a.m., se observa una meseta bastante amplia desde las 6 a.m. hasta las 9 a.m., con el máximo a las 7 a.m., hacia la tarde hay otra meseta que inicia a las 5 p.m. hasta las 7 p.m., todo en concordancia con las horas pico de la mañana y de la tarde, y por último un pico menor a las 11 p.m. que está asociado al cierre de la jornada entera de un día ya que posterior a ello la magnitud de aceleración decae drásticamente. Los días sábado igualmente inicia a el ascenso a las 5 a.m. pero en menor escala, alcanza el pico a las 6 a.m. y luego va reduciendo hasta el final del día. Para los domingos el inicio del aumento se retrasa hasta las 6 a.m, es prácticamente una meseta desde el primer pico a las 7 a.m. hasta las 7 p.m. con una magnitud de unos 20% a 30% menor que entresemana, y no alcanza los niveles de magnitud de los sábados sino hasta las horas de la tarde-noche.

B. Variación de la amplitud del ruido sísmico bajo diferentes medidas de control epidemiológico y etapas de la pandemia

A pesar de que ya se conoce sobre la significativa reducción en el ruido sísmico en Costa Rica en el año 2020 cuando inició la pandemia de COVID-19 [10], no existe un estudio posterior que detalle la variación de este con las diferentes medidas de control epidemiológico adoptadas, lo cual es analizado en esta investigación. Por cuestión de extensión se limita a presentar la variación de los días de entresemana para las diferentes etapas de la pandemia en las Fig. 4 y Fig. 5 en un arreglo similar a Fig. 3.

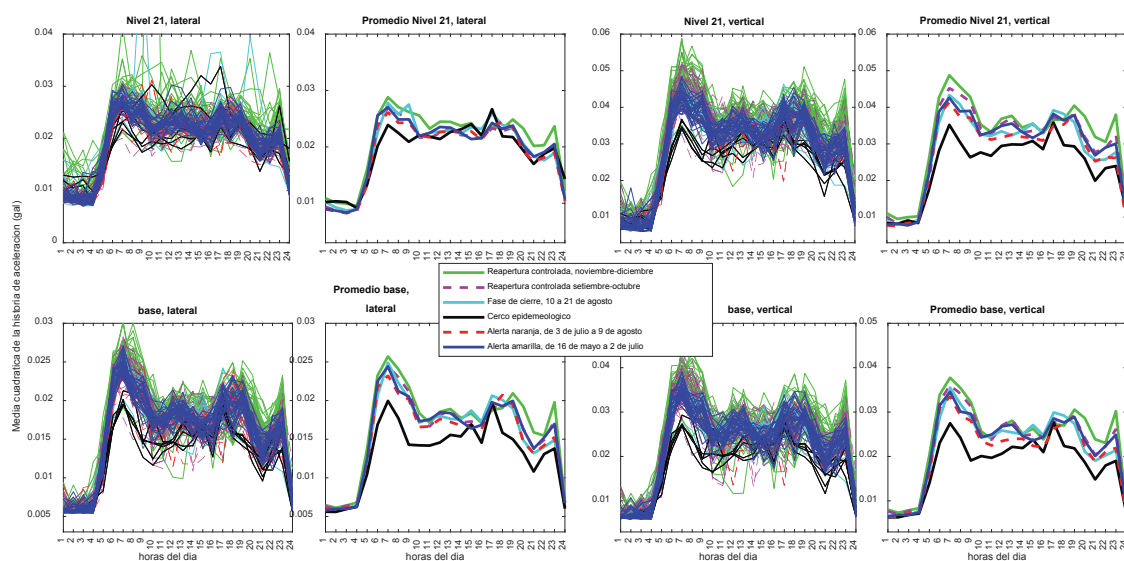


Fig. 4. Ejemplos de variación horaria de la media cuadrática de aceleración de los días de entresemana, para las diferentes etapas de control epidemiológico en el año 2020

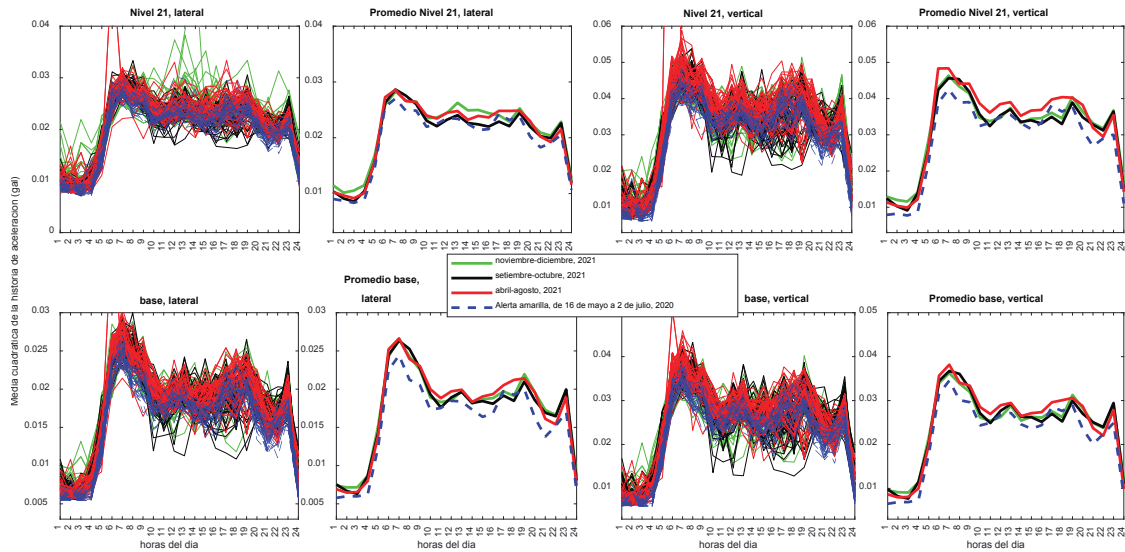


Fig. 5. Ejemplos de variación horaria de la media cuadrática de aceleración de los días de entresemana, para las diferentes etapas agrupadas en el año 2021, en comparación con la alerta amarilla en 2020

A través de las comparaciones de Fig. 4 y Fig. 5, se observa que la medida de mayor impacto es la del cerco epidemiológico, con restricción vehicular total y cierre de establecimientos, luego le sigue la alerta naranja. Durante la alerta amarilla se experimenta los mismos niveles de vibración que la fase de cierre. Avanzado hacia finales del año 2020, se observa que el nivel de las vibraciones va en aumento gracias a la relajación de las medidas de restricción y la reapertura económica que, durante mayo a agosto del año 2021 se experimentó el mayor nivel de vibración durante el periodo monitoreado, que incluso, supera por lo mínimo al nivel de los meses de noviembre y diciembre del mismo año.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de los patrones de variación horaria de las medias cuadráticas de aceleración en relación con las jornadas diarias y las distintas etapas de pandemia bajo diferentes medidas de restricción, se concluye que una de las principales fuentes de las vibraciones ambientales en edificaciones de centros urbanos son las actividades antropogénicas; donde las vibraciones ambientales podrían fungir como indicador potencial sobre la dinámica, nivel de actividad y movilidad de un lugar, las cuales también podrían correlacionarse con otras variables del transporte, económicas o sociales. Asimismo, la variación en la magnitud media de vibración durante diferentes etapas de la pandemia también sugiere sobre la efectividad de las medidas de restricción adoptadas en el control de la movilidad urbana especialmente en el año 2020.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento y reconocimiento al Dr. Víctor Schmidt Díaz y Dr. Aarón Moya Fernández en la instrumentación y recolección de datos de monitoreo de largo plazo, así como a las labores de todo el personal del LIS-UCR en el mantenimiento de la red acelerográfica.

REFERENCIAS

- [1] V. Schmidt, A. Macau, S. Figueras, B. Benjumea y Goula X., “Soil effects analysis in Cádiz Bay using ambient vibration measurements”, presentado en *8th International Workshop on Seismic Microzoning Risk Reduction*, Almería, España, 15-18 Marzo, 2009,
- [2] R. Godfrey, V. Schmidt, L. C. Esquivel y Y. C. Liu, “Identificación de modos de torsión empleando la medición de vibraciones ambientales y el análisis espectral en dos edificios de concreto reforzado”, *Revista de Ingeniería Sísmica*, No. 104, diciembre, 2020. doi:10.18867/ris.104.552.
- [3] S. S. Vásquez-González, “Implementación de métodos de identificación de sistemas multivariables en el dominio del tiempo con base en vibraciones ambientales para edificaciones”, Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2020.
- [4] J. Régnier, C. Michel, E. Bertrand, P. Guéguen, “Contribution of ambient vibration recordings (free-field and buildings) for post-seismic analysis: The case of the Mw 7.3 Martinique (French Lesser Antilles) earthquake, November 29, 2007”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 50, 2013, pp. 162-167. doi: 10.1016/j.soildyn.2013.03.007.
- [5] D. Beben, T. Maleska, P. Bobra, J. Duda, W. Anigacz, “Influence of Traffic-Induced Vibrations on Humans and Residential Building-A Case Study”, *Int J Environ Res Public Health*, 19(9):5441, abril, 2022. doi: 10.3390/ijerph19095441.
- [6] M. Arroyo-Solórzano, D. Castro-Rojas, F. Massin, L. Linkimer, I. Arroyo y R. Yani, “COVID-19 lockdown effects on the seismic recordings in Central America”, *Solid Earth*, 12(10), 2021, pp. 2127-2144. doi:10.5194/se-12-2127-2021.
- [7] F. L. Dias, M. Assumpção, P. S. Peixoto, M. B. Bianchi, B. Collaço, y J. Calhau, “Using Seismic Noise Levels to Monitor Social Isolation: An Example From Rio de Janeiro, Brazil”, *Geophysical Research Letter*, vol. 47, no. 16, 2020. doi:10.1029/2020GL088748.
- [8] B. Grecu, F. Borleanu, A. Tigănescu, N. Poiata, R. Dinescu y D. Tataru, “The effect of 2020 COVID-19 lockdown measures on seismic noise recorded in Romania”, *Solid Earth*, vol. 12, no. 10, pp. 2351-2368, 2021. doi:10.5194/se-12-2351-2021.
- [9] T. Lecocq et al., “Global quieting of high-frequency seismic noise due to COVID-19 pandemic lockdown measures”, *Science*, 369(6509), setiembre, 2020, pp. 1338-1343. doi: 10.1126/science.abd2438.
- [10] L. Linkimer, M. Arroyo-Solórzano e I. G. Arroyo, “Sismicidad y ruido sísmico en Costa Rica durante la pandemia del año 2020”, *Revista Geológica de América Central*, 64, pp. 1-18, 2021. doi: 10.15517/rgac.v0i64.46623
- [11] A. Carranza-Neurohr, “Calibración del modelo analítico del edificio “Torre Uno Paseo Colón” con base en resultados experimentales de análisis modal operacional”, Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2021.
- [12] C. Rainieri and G. Fabbrocino, *Operational Modal Analysis: overview and applications*, Termoli: University of Molise, 2008.

Análisis de indicadores de condición para priorización de intervención de puentes de Costa Rica

Analysis of bridge condition index to intervention prioritization in Costa Rica

Pablo Agüero Barrantes

Ingeniero, Unidad de Puentes del Lanamme, UCR

e-mail: pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr

Luis Guillermo Vargas Alas

Ingeniero, Unidad de Puentes del Lanamme, UCR

e-mail: luisguillermo.vargas@ucr.ac.cr

Palabras clave:

GESTIÓN, priorización, indicador, intervención, puentes.

Keywords:

BRIDGES, index, intervention, management, prioritization.

RESUMEN

En la gestión moderna de puentes, la priorización de intervenciones de puentes se apoya en indicadores diseñados para tomar las mejores decisiones de gestión. El presente artículo tiene como objetivo analizar los indicadores resultado del cálculo que realiza la herramienta analítica para gestión de puentes del MOPT/CONAVI denominada “Sistema de Administración de Estructuras de Puentes”. Se procedió al cálculo independiente de los indicadores utilizando la base de datos de inventario y daño en elementos de los puentes de la Red Vial Nacional proporcionada por la Administración. Los resultados confirmaron que los criterios definidos para el cálculo de indicadores no son ideales para priorizar actividades de rehabilitación y reemplazo de estructuras de puentes, ya que producen grupos de numerosos puentes con la misma calificación. Debido a lo anterior se procedió a proponer una modificación de los criterios para el cálculo de indicadores, los cuales producen menos puentes empatados con la misma calificación.

ABSTRACT

In modern bridge management, the prioritization of bridge interventions is supported by indicators designed to make the best management decisions. This paper aims to analyze the indexes resulting from the calculations performed by the bridge management analytical tool of the MOPT/CONAVI called the “Bridge Structure Management System.” The indicators were independently calculated using the inventory and damage database of bridge elements on the National Road Network provided by the Administration. The results confirmed that the criteria defined for the calculation of indicators are not ideal for prioritizing rehabilitation and replacement activities for bridge structures, as they produce groups of numerous bridges

with the same rating. Therefore, a modification of the criteria for calculating indicators was proposed, which results in fewer bridges tied with the same rating.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de puentes es un enfoque objetivo, sistemático, coherente, racional que incluye prácticas destinadas a establecer las mejores acciones costo-efectivas [1][2]. La gestión de puentes busca incentivar un uso costo-efectivo de los recursos disponibles, así como la implementación de las mejores prácticas ingenieriles en las intervenciones que se lleven a cabo. Para lograr este objetivo se contempla el ciclo de vida de las estructuras, desde su conceptualización hasta su salida de operación, incluyendo el mantenimiento [1], con esto se busca además la conservación de las estructuras y alargar su periodo de reconstrucción, lo cual, generaría mayores impactos positivos en el entorno. Para determinar las necesidades de intervención se contempla el nivel de inventario, o nivel de red, y el nivel de proyecto, o nivel individual [2].

Lo sistemas de gestión de puentes (SGP) se apoyan en el uso de herramientas analíticas que manejan bases de datos, usualmente de gran tamaño, para aplicar las políticas y objetivos del SGP y entregar información que permite tomar las mejores decisiones [3].

En Costa Rica la herramienta analítica oficial del MOPT/CONAVI se denomina Sistema de Administración de Estructuras de Puentes, a partir de aquí “herramienta SAEP”, la cual fue desarrollada a través de una consultoría financiada por la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA) [4]. La herramienta SAEP fue entregada a la Administración en el año 2007, sin embargo, el llenado de la base de datos se realizó en el periodo 2014-2018, incluyendo los puentes de la Red Vial Nacional (RVN). La herramienta SAEP cuenta con tres módulos: a) determinación del grado de deterioro, b) priorización de intervención y c) intervención de costo. La primera corrida de la herramienta dio como resultado los valores de los indicadores para priorización de intervenciones, pero debido a la falta de un antecedente o calibración de los indicadores no fue posible establecer si los resultados eran un insumo suficiente para realizar una priorización costo-efectiva.

Con base en lo anterior, se definió el objetivo de la presente investigación, el cual es proponer mejoras a la metodología de priorización basada en indicadores de la herramienta informática SAEP, basado en la revisión y análisis de los resultados de su aplicación en la base de datos de inventario e inspección de 1669 de puentes, cuyos datos se recolectaron según los lineamientos incluidos en [5]. Lo anterior, para brindar una herramienta que permita asignar de una manera eficiente los recursos para la intervención de puentes.

La propuesta de mejora incluye la modificación de los indicadores al tomar en cuenta la realidad del país, lo cual resultaría en un listado de priorización de intervención de puentes registrados en la herramienta SAEP que están en mal estado y que requieren ser rehabilitados o sustituidos.

II. METODOLOGÍA

Para realizar la presente investigación se cuenta con una base de datos de la herramienta SAEP con datos de 1669 puentes. Se realizó una revisión de los datos y una revisión independiente del

cálculo de los indicadores con base en los criterios de [6]. Una vez replicado el cálculo de los indicadores, se procede a analizar los resultados como insumo para tomar decisiones de intervención de puentes. Finalmente, se proponen modificaciones al cálculo de los indicadores cuando se ha identificado alguna oportunidad de mejora.

Cabe mencionar que los módulos de determinación del grado de deterioro y priorización de intervención de la herramienta SAEP utilizan como enfoque para la priorización el Proceso Analítico de Jerarquías (PAJ) propuesto por Thomas L. Saaty de la Universidad de Pittsburgh en la década de 1970, la cual es una metodología de toma de decisiones usada para análisis de gran escala y multicriterio. Los criterios que utiliza la herramienta SAEP se encuentran en [6], además el lector puede encontrar en [7] ejemplos detallados de la aplicación enfocados a infraestructura del transporte. A continuación, se presentan los tres indicadores por evaluar.

A. Índice de la Condición del Puente

El primer indicador es el Índice de la Condición del puente, denominado BCI, por el acrónimo en inglés de “Bridge Condition Index”, el cual toma la calificación más severa para los grupos de elementos subestructura, superestructura y accesorios y los multiplica por sus respectivos pesos. Este indicador no está incluido en la herramienta informática SAEP, pero fue utilizado por el CONAVI para brindar una lista preliminar de priorización de puentes. Las calificaciones de daño de los grupos tienen valores enteros asignados de 1 a 5, donde 1 significa que no hay daño y 5 es el daño más severo, según la escala de calificación [5]. Se asignaron pesos por grupo de 5%, 45% y 50% para accesorios, superestructura y subestructura, respectivamente. En la Fig. 1(A) se presenta una representación gráfica del cálculo del indicador BCI donde las flechas representan pesos relativos.

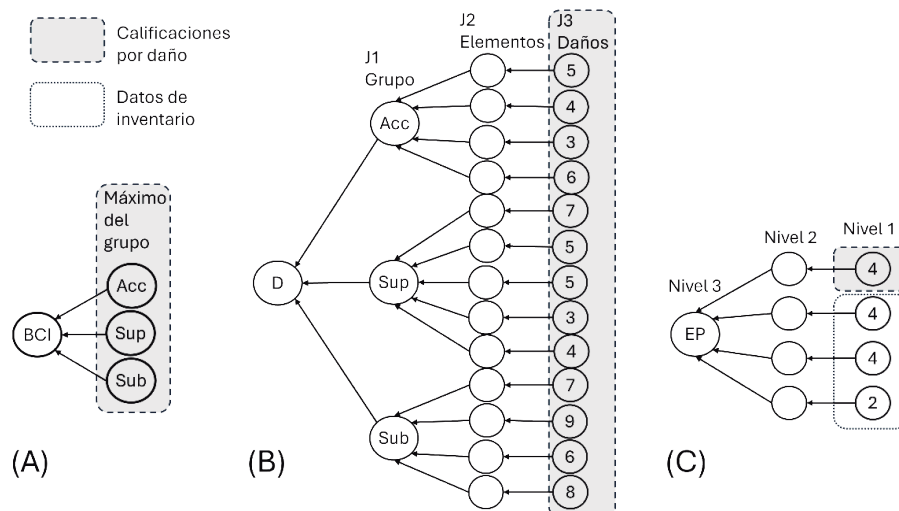


Fig. 1. Presentación esquemática del cálculo de los indicadores de la herramienta SAEP. (A) índice de la condición del puente BCI, (B) deficiencia D y (C) punto de evaluación EP. Las flechas representan pesos relativos. Acc = accesorio, Sup = superestructura y Sub = subestructura

B. Indicador de la Deficiencia

El segundo indicador por evaluar es la deficiencia (D), la cual es calculada en el módulo de determinación del grado de deterioro de la herramienta SAEP utilizando los datos de deterioro de los elementos estructurales [5]. El indicador D se puede utilizar para definir puentes que requieren pruebas específicas más allá de la inspección visual, como es el caso de una inspección detallada.

El indicador D se calcula multiplicando los daños por sus respectivos pesos relativos, los cuales son definidos utilizando el PAJ, para tres niveles o jerarquías definidos en [6] y representados en la Fig. 1(B). La primera jerarquía es el agrupamiento de los elementos del puente en accesorios, superestructura y subestructura. La segunda jerarquía contiene los elementos de los grupos de la jerarquía 1, por ejemplo, para la subestructura: cuerpo del bastión, cuerpo de la pila, etc. La tercera jerarquía incluye las calificaciones de daño (datos de inspección) del catálogo de daño de [5] correspondiente a cada elemento de la jerarquía 2. Por simplificación la jerarquía “J3 Daños” de la Fig1(B) incluye la cantidad de daños para cada ítem de la jerarquía “J2 Elementos”, para un total de 72 daños por evaluar en puentes de acero y 71 en puentes de concreto [5].

Cada jerarquía tiene asignado un grupo de pesos que dependen de la importancia relativa de cada ítem con respecto al resto dentro de la jerarquía respectiva. Esta importancia relativa, y por ende el peso, se definió por parte del panel de expertos que participaron en el desarrollo de la herramienta SAEP, y como tal tiene carácter subjetivo y por lo tanto debe ser objeto de revisión constante, calibración, discusión y mejora, conforme la herramienta es utilizada.

En la jerarquía 3 los daños del catálogo [5] son calificados con valores enteros de 1 a 5, los cuales se multiplican por los pesos correspondientes, para calcular un primer valor de deficiencia (D3); luego los valores de D3 se multiplican por los valores de los pesos de la jerarquía 2, para calcular el segundo valor de la Deficiencia (D2). Finalmente, los tres valores de D2 (accesorios, superestructura y subestructura) se multiplican por los pesos de los tres grupos de la jerarquía 1 para obtener el valor de la deficiencia del puente (D).

C. Indicador Punto de Evaluación

El último indicador por evaluar es el denominado Punto de Evaluación (EP), también basado en el PAJ, y calculado por el módulo de priorización de intervención de la herramienta SAEP. La principal función del EP es generar una priorización de puentes para intervención, tomando en cuenta el daño en los elementos seleccionados (datos de inspección rutinaria) y datos de inventario (capacidad de carga, ancho, altura libre, volumen de tráfico, tipo de ruta, longitud de desvío, etc.). El cálculo del indicador incluye grupos en 3 niveles, con sus respectivos límites numéricos. Como se puede apreciar en la Fig.1(C) el nivel 3 define cuatro grupos que contienen los ítems del nivel 2 (daño estructural, características funcionales, características de la vía y características estructurales).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las siguientes secciones se discute el análisis realizado a cada uno los indicadores BCI, D y EP, presentados en las secciones II.A, II.B y II.C, respectivamente.

A. Análisis del Índice de Condición del Puente BCI

El BCI presenta las siguientes ventajas: es un indicador simple y fácil de seguir (comparar esquemas de la Fig. 1), toma en cuenta todos los daños, elementos y componentes de [5] y es fácil de comunicar a los interesados en el tema de gestión de puentes. En contraste con lo anterior, se detectaron las siguientes debilidades: no toma en cuenta características funcionales de los puentes (datos de inventario), es una metodología que utiliza el enfoque del “peor primero” (concepto “worst first” en inglés), no existe una justificación de los límites de los rangos propuestos para definir las categorías de condición y su simplicidad tiene mucha influencia en los resultados, los cuales son muy conservadores.

Con respecto a la última debilidad, los daños por grupo se tratan como si todos tuvieran la misma importancia, aún cuando la misma herramienta SAEP asigna distintas importancias relativas. Lo anterior implica que una alta calificación (4 o 5) en un daño poco importante equivale a una alta calificación en un daño importante. En la Fig. 2 se puede observar que la geometría del BCI presenta “escalones” los cuales son grupos de puentes con calificación muy similar, lo que dificulta su priorización.

B. Análisis de la Deficiencia D

El indicador D está basado en el JAP, el cual tiene un respaldo teórico sólido, siempre y cuando los criterios para definir la importancia relativa de cada jerarquía hayan sido definidos por expertos en el tema. Otra fortaleza del indicador D es que su desarrollo fue realizado en conjunto con expertos japoneses que realizaron la transferencia de conocimiento a la Administración [4]. Una de las principales debilidades del indicador D es que depende de hasta 84 variables relacionadas únicamente con daño, lo cual, según el tipo de puente a evaluar, hace que el indicador sea muy completo, pero dificulta la interpretación del resultado obtenido. El lector puede observar en la Fig. 1 la complejidad del indicador D con respecto al BCI y al EP. En la Fig. 2 se presenta el resultado del cálculo del indicador D.

C. Análisis y mejoras propuestas para el Punto de Evaluación EP

El indicador EP presenta las mismas ventajas que el indicador D. Una de las principales desventajas identificadas es la presencia de los límites numéricos de cada nivel, lo cual propicia que aproximadamente el 40% de los puentes del inventario obtengan la calificación máxima (Ver Fig. 2). Además, a pesar de que [6] no lo dice explícitamente, el indicador está enfocado en priorizar puentes candidatos a rehabilitación y sustitución, pero no para ser utilizado en programas de conservación de los puentes que se encuentran en mejor estado. A pesar de que el enfoque del “peor primero” no

es recomendable desde el punto de vista costo-efectivo, se reconoce que la realidad de Costa Rica obliga a priorizar puentes que no han recibido mantenimiento por décadas.

Para realizar la mejora del indicador EP, se procedió a determinar las variables que no son representativas para la priorización. Debido a lo anterior, se eliminó la calificación del daño en los accesorios, el ancho del puente, las alturas libres superior e inferior y si el puente tiene adosado servicios (agua, electricidad, telecomunicaciones). Con respecto al daño estructural, se consideraron solo las calificaciones de 16 daños considerados los de mayor importancia para calificar la condición estructural de un puente. Además, se eliminaron los límites numéricos mencionados en el párrafo anterior. Seguidamente, se agregó un criterio para la longitud del puente debido al posible impacto de dicha característica cuando se ejecute una intervención. También se revisó la calidad de la información de la base de datos y se propuso reducir la importancia (el peso) del ítem “capacidad de carga” debido a que solo el 14% de los puentes cuentan con el dato. También se redujo el peso del ítem “longitud de desvío” debido a que no existe un criterio estándar para calcularla. En la Fig. 2 se presenta la comparación del BCI con el indicador propuesto denominado PDI, el indicador de punto de evaluación del SAEP, normalizado a una escala entre 0-5, y el indicador de deficiencia del SAEP. El PDI toma en cuenta para su cálculo datos de daño e inventario y presenta una geometría que evita que grupos de puentes obtengan calificaciones con valores muy similares, lo que facilita la priorización.

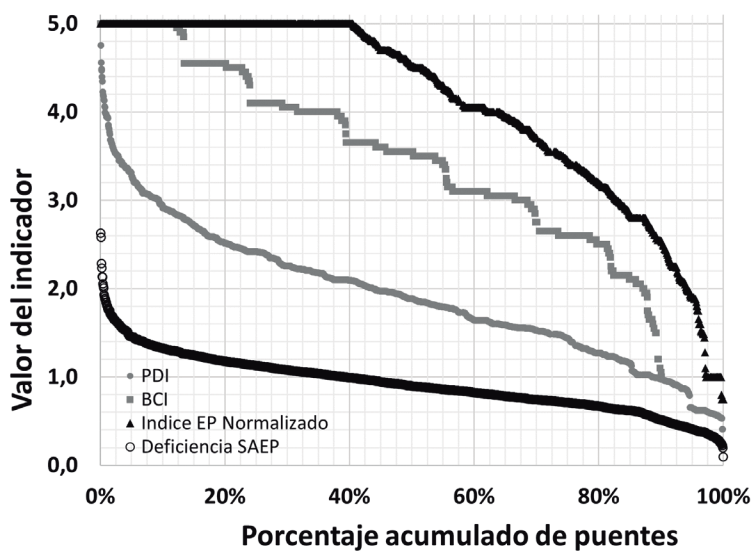


Fig. 2. Comparación del PDI con el BCI, el EP normalizado y el indicador D

CONCLUSIONES

En la presente investigación se analizó la metodología oficial de la Administración para la priorización de puentes de la Red Vial Nacional, además se identificaron oportunidades de mejora para los indicadores. Se concluye que el indicador BCI es muy conservador y propicia el empate

de estructuras en grupos de numerosos puentes, lo que dificulta su priorización. Con respecto al indicador PE, la existencia de límites numéricos en sus jerarquías e incluir algunas variables poco relevantes hacen difícil su interpretación para priorización de puentes.

Debido a lo anterior, se propuso el indicador PDI, el cual es una modificación del PE, donde fueron eliminadas variables que no generan gran influencia en los resultados o que cuentan con información incompleta, además se modificaron pesos relativos, se eliminaron límites en los niveles de jerarquía y se agregó una nueva variable.

Los resultados obtenidos ofrecen un insumo que la Administración puede utilizar para priorizar puentes que requieren rehabilitación y sustitución, esto es puentes con daño importante. Se recomienda a la Administración establecer criterios para ejecutar un programa de conservación de puentes, lo cual se ha demostrado que es un mejor enfoque costo-efectivo en lugar del tradicional “lo peor primero”.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se realiza en colaboración con la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural, parte del LanammeUCR. Se agradece a la institución por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] M.J. Ryall, “*Bridge Management*”, 2da ed. Oxford, Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2001. ISBN-13: 978-0-7506-8511-5
- [2] AASHTO, “*The Manual for Bridge Evaluation*”, 3ra ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2018. ISBN: 978-1-56051-683-5
- [3] FHWA, “*FHWA-NHI-130109A Bridge Management Fundamentals*”. Online course. 2016.
- [4] JICA, “*El estudio sobre el desarrollo de capacidad en la planificación de rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes basado en 29 puentes de la red de carreteras nacionales en Costa Rica*”. Tokio, Japón: Agencia de Cooperación Internacional de Japón, 2007.
- [5] MOPT, “*Manual de Inspección de Puentes*”. 1era ed. San José, Costa Rica: Dirección de Puentes. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007.
- [6] MOPT, “*Lineamiento para Mantenimiento de Puentes*”. 1era ed. San José, Costa Rica: Dirección de Puentes. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2007.
- [7] FHWA, “*Foundation Reuse for Highway Bridges*”. Report No. FHWA-HIF-18-055. Virginia, EEUU: Federal Highway Administration, 2018.
- [8] L.G. Vargas-Alas, E. Villalobos-Vega y R. Castillo-Barahona, “*Asesoría al CONAVI: Programa de Intervención de Puentes en Estado Deficiente*”. Proyecto: LM-PIE-UP-A01-2019. San José, Costa Rica: Programa de Ingeniería Estructural, LanammeUCR.

Marcos con riostras intencionalmente excéntricas de sección W y HSS redondas

Frames with intentionally eccentric braces with W shape and HSS bracing members

Andrés González Ureña

Profesor asociado, Escuela de Ingeniería Civil y Laboratorio de Ingeniería Sísmica, UCR

e-mail: andres.gonzalezurena@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo, diseño sismorresistente, marcos arriostrados de acero, marcos con riostras intencionalmente excéntricas, riostras con excentricidad intencional

Keywords:

Braces with Intentional Eccentricity (BIEs), earthquake-resistant design, Frames with Intentionally Eccentric Braces (FIEBs), steel braced frames, Non-Linear Response-History Analysis (NLRHA)

RESUMEN

Desplazar el eje de una riostra por lo demás convencional con respecto a la línea de acción de las fuerzas modifica su respuesta de fuerza contra deformación y desencadena beneficios significativos para el diseño sismorresistente. Cuando se utilizan en marcos con riostras intencionalmente excéntricas (FIEB, del inglés *Frame with Intentionally Eccentric Braces*), la excentricidad ajustable de las riostras con excentricidad intencional (BIE, del inglés *Brace with Intentional Eccentricity*) permite un mayor control sobre la respuesta dinámica de la estructura y reduce la sobrerresistencia incidental. En esta ponencia, se evalúa la aptitud de las secciones W y de las secciones estructurales huecas redondas para ser empleadas como riostras en FIEB. Para ello, se diseñan edificios prototipo de diferentes alturas utilizando FIEB con las secciones mencionadas como sistema de resistencia sísmica que luego se someten a análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo. Los edificios demuestran un desempeño adecuado ante las cargas sísmicas, lo que sugiere que las secciones consideradas son aptas para su empleo en FIEB.

ABSTRACT

Offsetting the axis of otherwise conventional steel braces with respect to the frame diagonal modifies their force-displacement response and brings about important advantages for earthquake-resistant design. Used in multi-storey Frames with Intentional Eccentricity (FIEBs), the adjustable eccentricity of Braces with Intentional Eccentricity (BIEs) grants a better control over the dynamic behaviour of the structure and reduces overstrength. In this presentation, the suitability of W shapes and round Hollow Structural Sections (HSS) as bracing members in FIEBs is evaluated. To this end, prototype buildings of varying height with W shape- and round HSS-based FIEBs as seismic-force-resisting systems are designed and

subjected to Non-Linear Response -History Analysis (NLRHA). The resulting buildings offer a satisfactory response to earthquake loading, indicating that the considered sections are apt for use as BIEs in FIEBs.

I. INTRODUCCIÓN

Las riostras con excentricidad intencional (BIE, del inglés *Brace with Intentional Eccentricity*) son riostras de acero cuyo eje longitudinal está distanciado de la línea de acción de las fuerzas. Este tipo de riostra fue propuesto inicialmente por Skalomenos et al. [1] como una alternativa superior a las riostras concéntricas tradicionales (CLB, del inglés *Concentrically Loaded Braces*) dado que su respuesta a la carga combina esfuerzos axiales y de flexión, lo que resulta en una rigidez inicial más baja y en una rigidez post-elástica en tensión significativa. Además, es posible controlar estas propiedades ajustando la excentricidad y, puesto que en compresión la respuesta de la riostra es flexional, el desarrollo de pandeo local se retrasa, lo que resulta en una mayor resistencia a la fractura [1-3]. El uso de BIE en edificios de varios pisos ha sido estudiado numéricamente [2,4]. Los marcos con riostras intencionalmente excéntricas (FIEB, del inglés *Frames with Intentionally Eccentric Braces*) considerados en dichos estudios mostraron un desempeño adecuado ante cargas sísmicas en análisis no lineales dinámicos de respuesta en el tiempo (NLRHA, del inglés *Non-Linear Response-History Analysis*), lo que sugiere que el sistema sismorresistente podría eventualmente ser incorporado en la normativa de diseño sísmico. Sin embargo, las investigaciones citadas consideraron únicamente BIE de con secciones estructurales huecas (HSS, del inglés *Hollow Structural Section*) cuadradas. En esta ponencia se evalúa la aptitud de las HSS redondas y de las secciones W para su uso como riostras en FIEB. Para ello, se diseñan edificios prototipo con FIEB con dichos dos tipos de secciones como sistema sismorresistente para la amenaza sísmica de San José, Costa Rica, y se examina su desempeño con NLRHA en el programa OpenSees [5].

II. PROPIEDADES GENERALES DE LAS BIE

En la Fig. 1 se presenta un esquema de los componentes de una BIE. La excentricidad, e , se introduce por medio de los ensambles excentradores. Estos tienen la función de transmitir rígidamente las fuerzas entre el cuerpo de la riostra y las conexiones al marco. La longitud de los ensambles *excentradores*, L_{ea} , y su proporción dentro de la longitud total de la BIE, L , es relevante pues define la demanda de rotación en los extremos del cuerpo de la riostra, como se explica en [3]. El comportamiento articulado de las conexiones que se asume para diseño puede lograrse en la práctica utilizando placas de conexión detalladas con una longitud libre que permita su rotulación plástica en flexión a niveles bajos de carga axial, posibilitando así la rotación libre de los ensambles *excentradores*. Este detalle es común en los marcos arriostrados concéntricamente (CBF, del inglés *Concentrically Braced Frame*). Bajo carga de tensión, las BIE exhiben una rigidez elástica inicial hasta que la fibra extrema en tensión alcanza el esfuerzo de cedencia. Si la carga continúa incrementándose, la plastificación progresa a través de la sección transversal mientras que la BIE presenta una rigidez post-elástica significativa hasta que alcanza la capacidad máxima de su sección transversal, es decir el producto de su área bruta, A , y el

esfuerzo de cedencia, F_y . La magnitud de las rigideces elástica y post-elástica y el nivel de fuerza en la transición entre ambas depende de la excentricidad. Bajo carga de compresión, la riostra se flexiona alejándose de la línea de acción de las fuerzas bajo la acción combinada de fuerza axial y momento flexor y pasa gradualmente del rango elástico al de post-pandeo. Cuando se utilizan en pares en vanos arriostrados, las BIE producen una curva de cortante contra desplazamiento horizontal con rigidez continuamente positiva, en contraste con la que produce un par de CLB, marcada por una caída en la carga debido al pandeo de la riostra en compresión. Un ejemplo de la influencia de la excentricidad sobre el comportamiento bajo carga monotónica de tensión y de compresión de una BIE aislada y sobre la respuesta de cortante contra desplazamiento lateral de un vano arriostrados con un par de las mismas BIE se presenta en la Fig. 2. Para una descripción detallada de las propiedades mecánicas de las BIE, refiérase a [1-3].

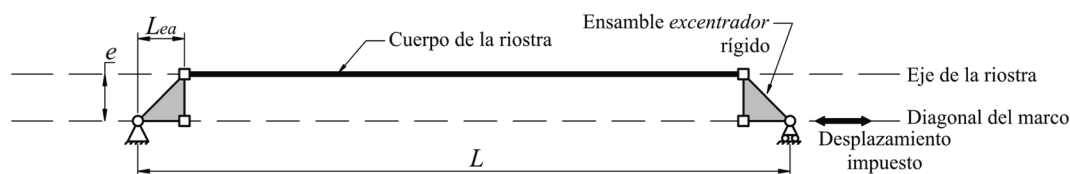


Fig. 1. Componentes de una BIE

III. DISEÑO DE LOS FIEB

Los métodos de diseño basados en fuerzas no se adaptan bien a los FIEB ya que el cortante de piso que estos proveen varía significativamente con el desplazamiento horizontal y porque su capacidad máxima se alcanza a desplazamientos que exceden los límites establecidos en códigos de diseño. Por lo tanto, recurrir a un diseño basado en desplazamientos representa una elección lógica, dado que el cortante de piso se puede estimar fácilmente para desplazamientos predeterminados utilizando curvas simplificadas de la respuesta de carga contra desplazamiento de las BIE. El procedimiento de diseño utilizado en este estudio es una adaptación del Diseño Directo Basado en Desplazamientos propuesto por Priestley et al. [6] y se explica en detalle en [2, 4]. Se diseñaron edificios con FIEB de 12, 8, y 4 pisos con la configuración de planta mostrada en la Fig. 3, una razón de deriva objetivo de 2.0 % y las cargas gravitacionales presentadas en la Tabla 1 en dos versiones: una con BIE de sección W y otra con BIE HSS redondas. Las riostras se dispusieron como diagonales opuestas en vanos adyacentes. La altura de todos los niveles se fijó en 4.5 m. En el diseño se respetaron los lineamientos aplicables del Código Sísmico de Costa Rica 2010, revisión 2014, [7] y de ANSI/AISC 360-22 [8], suponiendo un emplazamiento en San José, Costa Rica en un suelo arcilloso moderadamente rígido (i.e. tipo de sitio S_3 según [7]).

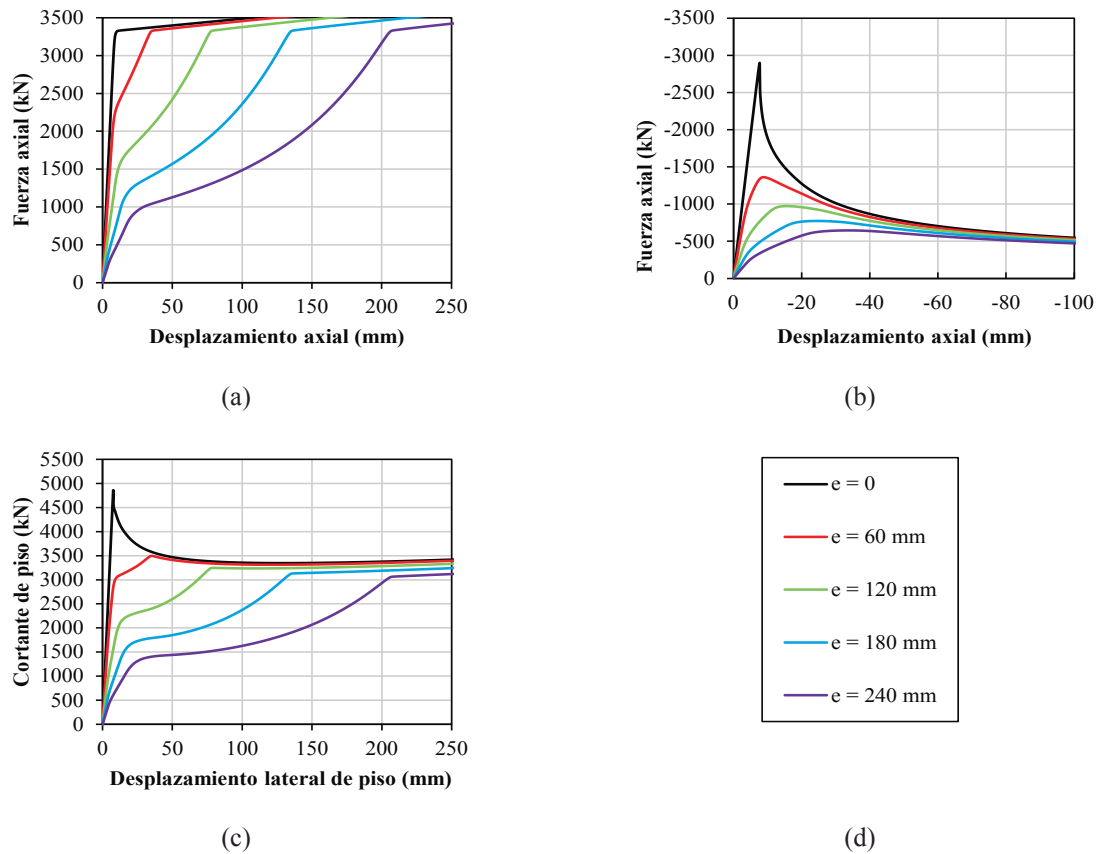


Fig. 2. Influencia de la excentricidad en la respuesta de una BIE HSS 178x178x16 con $L = 5408$ mm y $Lea = 360$ mm: tensión (a), compresión (b), cortante en un vano arriostrado (c) y leyenda (d)

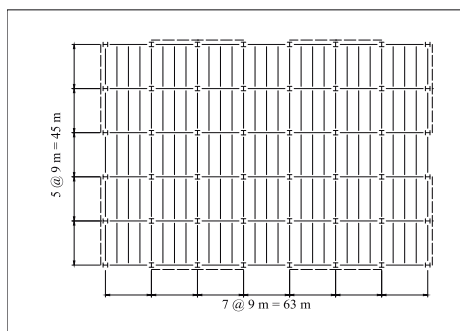


Fig. 3. Planta de los edificios (la ubicación de los FIEB se indica con líneas punteadas)

CUADRO I CARGAS GRAVITACIONALES DE DISEÑO

Cargas gravitacionales [kPa]	
Azotea:	Permanente = 1.65
	Temporal = 0.98
Entrepisos:	Permanente = 3.8
	Temporal = 2.45
Fachada:	Permanente = 1.5

Las configuraciones de los ensambles excentradores considerados en diseño se presentan en la Fig. 4. Para las BIE con sección W, la excentricidad se introduce por medio de dos placas laterales a las que se sueldan las alas de la sección W. Esta configuración es equivalente a la que

se empleó en [2, 4]. En el caso de las BIE con HSS redonda, dado que la sección no es compatible con placas laterales, se utilizó un ensamble *excentrador* que consiste en una placa de remate rigidizada, similar al empleado por Skalomenos et al. [1]. Se utilizaron además rigidizadores de costilla soldados a la HSS en sus extremos para reducir la probabilidad de una fractura en tensión, como se describe en [1]. Para ambos tipos de sección, se utilizó una conexión mediante angulares empernados entre placa cuchilla y placa nudo para que la deformación de las riostras se produjera en el plano del marco. Para el diseño de las BIE, se generaron curvas simplificadas de carga contra desplazamiento a partir de los resultados de análisis en OpenSees de modelos de elementos finitos de BIE aisladas sujetas a carga monotónica de tensión y compresión para estimar el cortante de piso producido por un par de BIE en función del desplazamiento lateral. Se consideraron excentricidades entre 0 y dos veces el peralte de cada sección, en incrementos de 10. Se tomaron en cuenta todas las secciones W y HSS redondas incluidas en el *Steel Construction Manual, 16th Edition* (AISC) [9]. En estos modelos, se consideró la resistencia a la cedencia nominal de las secciones W ASTM A992 y de las HSS ASTM A1085, es decir $F_y = 345$ MPa. Las riostras y sus componentes se dimensionaron para los vanos de 9 m por 4.5 m que ocuparían en los edificios. A la fecha, no existe información publicada sobre la vida de fractura de BIE de sección W o HSS redonda. Por lo tanto, se consideró apropiado emplear en las riostras únicamente secciones que satisficieran los límites de compacidad para ductilidad alta según ANSI/AISC 341-22 [10] para minimizar la probabilidad de fractura por fatiga de bajo número de ciclos inducida por pandeo local. Las fuerzas de diseño por capacidad consideradas para los miembros protegidos del sistema sismorresistente se estimaron suponiendo para el material de las riostras un esfuerzo de cedencia probable igual a $R_y F_y$, según [10] y considerando razones de deriva máximas superiores en 25 % a las razones de deriva objetivo. Para las vigas y columnas en ambos tipos de FIEB, se utilizaron secciones W que cumplieran con los límites de compacidad para ductilidad alta ya que esto es lo que requiere [10] para los CBF dúctiles. Se diseñaron los FIEB con las columnas orientadas de modo que la flexión ocurriera alrededor de su eje menor. Se calculó el tonelaje aproximado de los edificios diseñados, encontrándose que los FIEB con BIE de sección W requieren entre 17 % y 39 % menos material que los diseñados con HSS redondas. Pueden citarse dos factores que explican esta diferencia. En primer lugar, existen menos HSS redondas que cumplen con los requisitos de compacidad para miembros con ductilidad alta que secciones W, lo que impacta la eficiencia de diseño y produce sobrerresistencia. Por otro lado, el factor R_y correspondiente a las HSS redondas ASTM A1085, 1.25, es significativamente más alto que el aplicable a las secciones W ASTM A992, 1.1, lo que resulta en fuerzas de diseño por capacidad más altas para vigas y columnas.

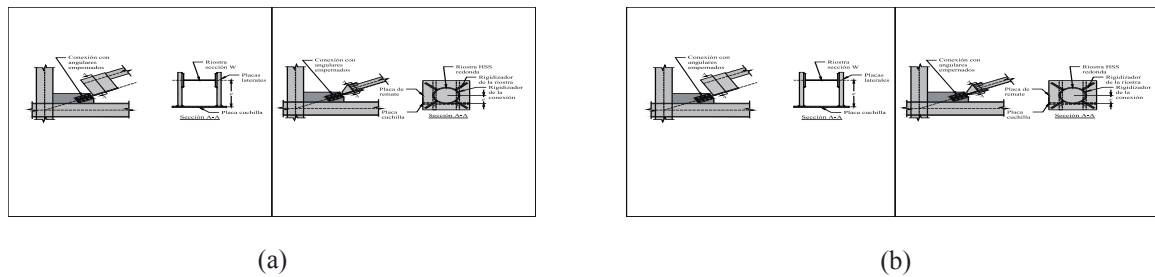


Fig. 4. Configuraciones de los ensambles *excentradores* considerados en diseño: BIE de sección W (a), y BIE de HSS redonda (b)

IV. ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO DE RESPUESTA EN EL TIEMPO (NLRHA)

Se evaluó numéricamente el desempeño de los FIEB diseñados bajo demandas sísmicas consistentes con la demanda de diseño a través del NLRHA de modelos de las estructuras. Para ello, se preparó un conjunto de registros sísmicos representativos de la amenaza sísmica del emplazamiento de los edificios descrita en [11], seleccionados y escalados para ajustarse al espectro de aceleración de diseño según los lineamientos de ASCE 7-22 [12]. El conjunto de registros utilizado incluye registros de sismos corticales tomados de la base de datos PEER NGA West 2 [13] y de sismos de subducción tomados de las bases de datos K-NET y KiK-net [14]. Los 6 FIEB se modelaron utilizando secciones de fibras y elementos tipo barra controlados por fuerza en OpenSees; de este modo fue posible considerar plasticidad distribuida en las riostras, vigas y columnas. Se consideró también la no-linealidad geométrica en los modelos utilizando una transformación de coordenadas corotacional para tomar en cuenta grandes deformaciones y los efectos $P-\Delta$. Los miembros estructurales se subdividieron en 8 elementos para capturar adecuadamente los efectos $P-\delta$. El efecto desestabilizante de las cargas gravitacionales que actúan en la porción de la estructura cuya masa es tributaria al marco estudiado se incorporó utilizando una columna auxiliar ficticia adosada al marco sobre la que se aplicaron las cargas.

Las razones de deriva máximas registradas en el análisis se presentan en la Fig. 6. Los FIEB con HSS redondas y con secciones W muestran valores máximos similares, lo que indica que el tipo de sección no impacta significativamente la respuesta dinámica de la estructura. En todos los casos, la razón de deriva máxima promedio es menor que el objetivo de 2.0 %, mostrando que el procedimiento de diseño utilizado es efectivo al controlar las razones de deriva máximas. La diferencia entre la razón de deriva objetivo y los valores máximos observados aumenta con la altura del edificio. Esto se debe a que el procedimiento de diseño considera un vector de desplazamientos que no incluye los efectos de modos superiores, cuyo peso se incrementa con el número de pisos y es despreciable en el caso de los edificios de 4 niveles.

Adicionalmente, se revisaron los cortantes máximos desarrollados en cada piso y se compararon con los valores de cortante de diseño basado en capacidad que se emplearon para el diseño de los miembros protegidos de los marcos. En general, los cortantes máximos observados son

inferiores a los valores de diseño, excepto en algunos de los niveles más altos en los edificios de 12 niveles, lo que puede atribuirse también a los efectos de los modos superiores.

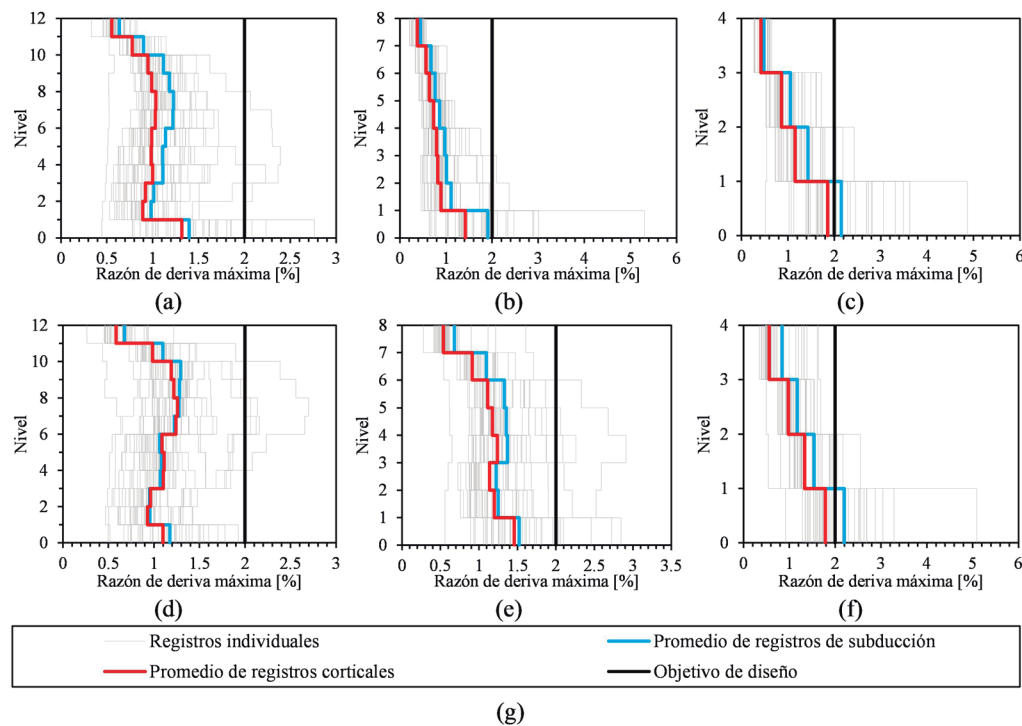


Fig. 5. Razones de deriva máximas: FIEB de 12 pisos con HSS redondas (a), FIEB de 8 pisos con HSS redondas (b), FIEB de 4 pisos con HSS redondas (c), FIEB de 12 pisos con secciones W (d), FIEB de 8 pisos con secciones W (e), FIEB de 4 pisos con secciones W (f) y leyenda (g)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que las secciones W y HSS redondas son aptas para su uso como BIE en FIEB de baja y mediana altura diseñados con la metodología de diseño basado en desplazamientos. Sin embargo, es necesaria mayor investigación, incluyendo ensayos físicos, para determinar con precisión las demandas máximas que pueden tolerar las BIE construidas con dichas secciones. En particular, es necesario examinar la ductilidad de los extremos de las riostras ante cargas de tensión y flexión simultáneas, considerando las altas demandas de rotación en dichas regiones como se explica en [3].

RECONOCIMIENTOS

Esta ponencia se basó en los Trabajos Finales de Graduación de los estudiantes de Licenciatura en Ingeniería Civil María José Zamora Durán y Daniel Iván Martínez Vargas.

REFERENCIAS

- [1] K.A. Skalomenos, H. Inamasu, H. Shimada H y M. Nakashima, “Development of a Steel Brace with Intentional Eccentricity and Experimental Validation”, *ASCE Journal of Structural Engineering*. 2017 Aug; 143(8)
- [2] A. González Ureña, R. Tremblay y C.A. Rogers, “Earthquake-resistant design of steel frames with intentionally eccentric braces”, *J Constr. Steel Res.* 2021 Mar 1; 178.
- [3] A. González Ureña, R. Tremblay y C.A. Rogers, “Experimental and numerical study of square HSS BIEs under cyclic loading”, *Eng Struct.* 2022 Feb 1; 252.
- [4] A. González Ureña, R. Tremblay y C.A. Rogers, “Design and performance of Frames with Intentionally Eccentric Braces”, presentado en *17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai; 2020
- [5] F. McKenna, M.H. Scott y G.L. Fenves, “Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition”, *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2010; 24(1): 95–107.
- [6] M.J.N. Priestley, G.M. Calvi, y M.J. Kowalsky, *Displacement-based seismic design of structures*. Pavia: IUSS Press; 2007.
- [7] Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. *Código Sísmico de Costa Rica 2010 Revisión 2014*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica; 2014.
- [8] American Institute of Steel Construction (AISC). *ANSI/AISC 360-22 Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction; 2022.
- [9] American Institute for Steel Construction (AISC). *Steel Construction Manual, 16th Ed.* American Institute for Steel Construction (AISC); 2022.
- [10] American Institute of Steel Construction (AISC). *ANSI/AISC 341-22 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction (AISC); 2022.
- [11] D.A. Hidalgo-Leiva, L. Linkimer, I.G. Arroyo, M. Arroyo-Solórzano, R. Piedra, A. Climent, et al, “The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica”, *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2023; 113(1): 23-40.
- [12] American Society of Civil Engineers (ASCE), Structural Engineering Institute (SEI). *ASCE/SEI 7-22 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE); 2022.
- [13] Pacific Earthquake Engineering Research Center U of C. *The PEER Ground-Motion Selection Web Application*. <http://ngawest2.berkeley.edu/>. 2024.
- [14] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. *NIED K-NET, KiK-net*. <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/>. 2024

Modelos 3D para la implementación de la metodología BIM en Patrimonio Arquitectónico

3D Models for the Implementation of the BIM Methodology in Architectural Heritage

Adolfo Piedra Mora

Investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica

e-mail: adolfo.piedra@ucr.ac.cr

Mauricio Varela Sánchez

Investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica

e-mail: mauricio.varelasanchez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Conservación del patrimonio, Escáner láser, Metodología HBIM, Modelado tridimensional, Nubes de puntos.

Keywords:

Heritage conservation, Laser scanner, HBIM methodology, Three-dimensional modeling, Point clouds.

RESUMEN

Los casos de estudio en la investigación son parte del Patrimonio Arquitectónico de Costa Rica, específicamente la Casona de la Hacienda Santa Rosa y la Ermita de la Agonía en Liberia, Guanacaste. Sobre dichas edificaciones se realizó un escaneo láser tridimensional para recopilar datos precisos y crear modelos tridimensionales paramétricos, en consonancia con las metodologías Building Information Modeling (BIM) y Heritage Building Information Modeling (HBIM). La metodología se dividió en dos fases: recolección de datos históricos y toma de datos gráficos y geoespaciales, seguida del modelado tridimensional paramétrico. Los resultados muestran la generación de nubes de puntos y modelos 3D precisos, destacando la incorporación de detalles como fisuras y degradaciones en los modelos. Se destaca la utilidad de estos modelos para gestionar y conservar las estructuras patrimoniales, subrayando la importancia de la metodología HBIM. Este enfoque promueve replicar dicha metodología en la preservación del patrimonio cultural al proporcionar representaciones fieles de las estructuras y facilitar la planificación de intervenciones de mantenimiento y restauración.

ABSTRACT

The case studies in the research are part of Costa Rica's Architectural Heritage, specifically the Casona de la Hacienda Santa Rosa and the Ermita de la Agonía in Liberia, Guanacaste. A three-dimensional laser scanning was conducted on these buildings to gather precise data and create parametric three-dimensional models, in line with the methodologies of Building Information Modeling (BIM) and Heritage Building Information Modeling (HBIM). The methodology was divided into two phases: historical data collection and

gathering of graphical and geospatial data, followed by parametric three-dimensional modeling. The results demonstrate the generation of point clouds and precise 3D models, highlighting the incorporation of details such as fissures and degradation in the models. The utility of these models for managing and conserving heritage structures is emphasized, underscoring the importance of the HBIM methodology. This approach advocates for replicating such methodology in the preservation of cultural heritage by providing faithful representations of the structures and facilitating the planning of maintenance and restoration interventions.

I. INTRODUCCIÓN

El Patrimonio Arquitectónico de Costa Rica representa parte del legado histórico de la sociedad costarricense y de cada una de las comunidades en las que se ubican los inmuebles de propiedad pública o privada con interés cultural e histórico, declarado así por el Ministerio de Cultura y Juventud (MCJ) de acuerdo con la Ley de la República N° 7555. Es por esto por lo que, la Escuela de Ingeniería Topográfica (EIT) de la Universidad de Costa Rica, realizó mediciones de diferentes edificaciones patrimoniales de las que se destacan la Casona de la Hacienda Santa Rosa y la Ermita de la Agonía, ambas en Liberia, Guanacaste.

El trabajo de campo realizado se llevó a cabo mediante un escáner láser terrestre, el cual es capaz de capturar y ubicar las formas de una estructura existente mediante la emisión de un láser, para ubicar millones de puntos, convirtiendo esos escaneos en una nube de puntos densa y con precisiones milimétricas [1].

Una de las áreas donde se utilizan las nubes de puntos es en la creación de modelos tridimensionales digitales, como parte de la metodología Building Information Modeling (BIM). Dicha metodología es la encargada del diseño, construcción y gestión de los edificios, entendiendo cómo estos funcionan, la manera en la que los mismos se construyen y administran [2].

Sin embargo, dicha metodología no solamente se aplica al diseño y construcción de nuevas obras, la metodología HBIM (Heritage Building Information Modeling), es utilizada para el modelado de construcciones existentes, como los edificios patrimoniales y de importancia histórico-arquitectónica. Creando, como parte del proceso, un modelo fiel a la realidad que contenga todas las características físicas y geométricas, tales como: información estratigráfica, materiales, degradación y deformaciones estructurales que describan con un alto nivel de detalle la estructura, en la época o tiempo en que se realizó la medición [3].

La importancia de los modelos tridimensionales realizados recae sobre la utilidad que se le puede dar al almacenar información diagnóstica del estado actual de la estructura, dar seguimiento al paso del tiempo y poder gestionar las acciones de intervención, conservación y preservación de dichas edificaciones, las cuales son piezas únicas de historia y cultura de la sociedad costarricense.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de los modelos tridimensionales se llevó a cabo en dos fases, iniciando con una recolección de datos históricos presentes en los expedientes patrimoniales de la edificación y la toma de datos gráficos y geospaciales a través de un escaneo láser y un estudio fotográfico con los que

se obtuvieron datos referentes a la posición de todos los elementos del patrimonio y el estado en la época que se realizaron los levantamientos de la información de campo. La segunda etapa se centró en utilizar todos los datos generados en las etapas anteriores y utilizando un software de modelado BIM, se realizó el modelo tridimensional paramétrico de cada uno de los objetos presentes en las estructuras.

A. Fase 1

En la primera fase se realizó una recolección de datos históricos de los expedientes, los cuales contemplan en su mayoría la información de las construcciones históricas, como planos constructivos e información general de restauraciones y las intervenciones realizadas a las estructuras, con el fin de utilizarlas como punto de partida, para tener ese primer acercamiento a la edificación y realizar la más óptima planificación posible de la medición.

En la recolección de datos gráficos y geoespaciales, para cada levantamiento se realizó un registro de cada uno de los estacionamientos escaneados, que comprende un alineamiento y fusión de las nubes para generar y exportar una nube conjunto que contemple cada edificio con sus tamaños y proporciones acorde a la realidad. El trabajo en el sitio también contempla un estudio fotográfico de las partes afectadas, restauradas e intervenidas de la edificación, dichas zonas fueron identificadas mediante los expedientes de la estructura.

B. Fase 2

Una vez que se obtuvieron las nubes de puntos de las estructuras se realizó una depuración de toda la información referente a puntos fuera de la zona de estudio, ruido y transeúntes que fueron captados por el escáner, con el fin de poder tener una nube que sea clara para ser utilizada como insumo para el modelado paramétrico tridimensional.

Luego se exportaron las nubes unificadas en diferentes formatos, con el fin de utilizarlas para realizar el modelo 3D según la información capturada. Este proceso se realizó con el paquete ACCA software del cual la EIT posee licencias educativas y es una de las soluciones más adecuadas para este tipo de trabajos, en especial para el HBIM, el cual permite realizar los modelos con la más alta fidelidad posible de la realidad.

III. RESULTADOS

En la etapa de recolección de datos históricos se encontraron para cada una de las edificaciones los expedientes de declaratoria que muestran los procesos que se realizaron para que las estructuras fueran denominadas patrimonio arquitectónico nacional, junto con lo anterior, se encontraron solicitudes de intervención, procesos de restauración y planos generales de las estructuras que fueron utilizados para dichos procesos. La información obtenida se utilizó tanto para la planificación del trabajo de campo como para el análisis de la degradación en conjunto con el estudio fotográfico realizado.

En la siguiente etapa de levantamiento y recolección de datos gráficos y geoespaciales de la Casona Santa Rosa y la Ermita de la Agonía se generaron aproximadamente 60 y 35 estacionamientos respectivamente, con escaneo láser tridimensional a partir del escáner Leica P40, de la EIT. En cada uno de los estacionamientos se generó una nube de puntos con un traslape de entre un 60% y 80% entre nubes. Una vez completado el registro de cada uno de los estacionamientos se generó la nube de puntos conjunto para ambas estructuras, con un error promedio en cada nube conjunto al unificarlas de 0,003 metros aproximadamente. En las Fig 1 y 2 se observan las nubes conjunto resultantes para las estructuras de la Casona Santa Rosa y la Ermita de la Agonía respectivamente.



Fig. 1. Nube de puntos Casona Hacienda Santa Rosa

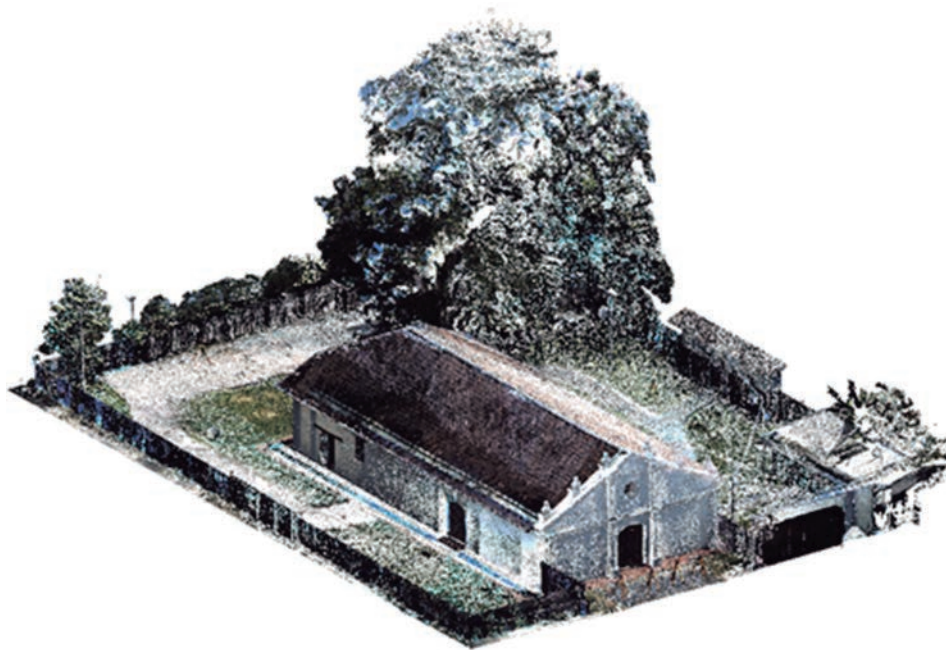


Fig. 2. Nube de puntos Ermita de la Agonía

En la fase de modelado tridimensional, partiendo de las nubes de puntos, se realizó el modelado 3D de cada uno de los elementos presentes en las estructuras patrimoniales mediante

el programa de modelado arquitectónico BIM. Se definieron los niveles de los monumentos sobre los cuales se realizaron secciones verticales y horizontales en la nube de puntos para trazar de forma individual las paredes, pisos, puertas, ventanas, tejados, escaleras, vigas, columnas y cada uno de los elementos presentes en las edificaciones, obteniendo como resultados para la Casona Santa Rosa y la Ermita de la Agonía respectivamente los modelos mostrados en la Fig 3 y 4.

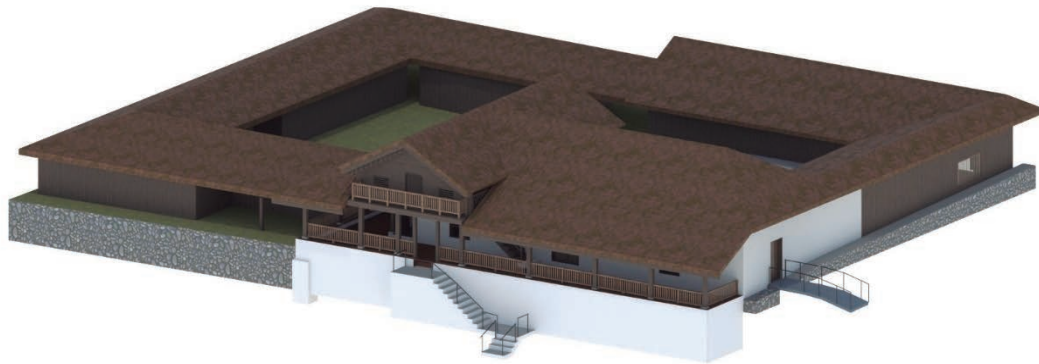


Fig. 3. Modelo 3D Casona Hacienda Santa Rosa



Fig. 4. Modelo 3D Ermita de la Agonía

Además, con la información obtenida durante el estudio fotográfico, se añadieron a los modelos paramétricos las fisuras, degradaciones y desprendimientos de material más relevantes. Esto permitió una representación visual detallada de los daños detectados en las estructuras de la Ermita de la Agonía y la Casona Santa Rosa en el momento del levantamiento. En la Fig. 5 se muestra una comparación entre la degradación real observada y su representación paramétrica en el modelo tridimensional de la Ermita de la Agonía.



Fig 5. Comparación entre la degradación observada y su representación en el modelo tridimensional

La incorporación de estos elementos en los modelos tridimensionales es una de las herramientas más efectivas que facilitarán la gestión, evaluación y comprensión del estado de conservación de los edificios. Este enfoque proporciona una base de datos visual del estado actual de las estructuras, lo que simplifica la planificación de futuras intervenciones de mantenimiento y restauración, dando paso a la implementación de la metodología HBIM.

CONCLUSIONES

Se generaron nubes de puntos completas y detalladas de la Casona en la Hacienda Santa Rosa y la Ermita de la Agonía, ambas en Liberia Guanacaste, mediante escáner láser, proporcionando suficiente información para el modelado tridimensional. Esto permitió crear modelos detallados y precisos de ambas estructuras.

A través del análisis de las deformaciones, fisuras y lesiones detectadas en las estructuras mediante el escáner láser y el estudio fotográfico, se resalta la importancia y eficacia de la tecnología aplicada. Este enfoque permite que profesionales de diversas disciplinas puedan utilizar los modelos como herramientas para realizar análisis estructurales, planificar el mantenimiento y evaluar los costos de inversión, entre otros aspectos.

La adaptación de la metodología al Patrimonio Arquitectónico Nacional de Costa Rica abre la posibilidad de replicar este enfoque en otras estructuras patrimoniales. Esta iniciativa demuestra la utilidad y la importancia de implementar la metodología HBIM en este tipo de edificaciones.

Los modelos paramétricos obtenidos proporcionan una representación fiel de las estructuras, lo que resulta invaluable en situaciones que puedan alterar su integridad. La capacidad de reconstrucción fiel ayuda a preservar la historia y los detalles originales de los monumentos, contribuyendo así a la conservación del patrimonio cultural.

REFERENCIAS

- [1] S. M. Levy, “Laser Scanning and BIM”, *Project management in construction*, vol. 7, pp. 509-510, September, 2017.
- [2] F. Choclán, M. Soler, and R. González, “Introducción a la Metodología BIM,” *Spanish Journal of building information modelling*. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/284159764_INTRODUCCION_A_LA_METODOLOGIA_BIM
- [3] C. Dore, M. Murphy, S. McCarthy, F. Brechin, C. Casidy, and E. Dirix, “Structural simulations and conservation analysis-historic building information model (HBIM),” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, pp. 351–357. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-351-2015.