

Revista de la Universidad de Costa Rica



JORNADAS DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



EDITORIAL
UCR



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FI Facultad de
Ingeniería

INII Instituto de
Investigaciones
en Ingeniería

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

29, 30 y 31 de octubre de 2025

PERSONAS EDITORAS

Víctor Schmidt-Díaz

Luis Manuel Zamora-González

Orlando Arrieta-Orozco

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

INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA EDITORIAL DEL VOLUMEN ESPECIAL

IEEE:

- [1] V. Schmidt-Díaz, L. M. Zamora-González, and O. Arrieta-Orozco, Eds., “VII Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2025”. En *Revista Ingeniería*, Volumen 36 NE6. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2025, pp 1-255. Doi 10.15517/ri.v36iNE6.5154.

APA:

Schmidt-Díaz, Zamora-González & Arrieta-Orozco. (Eds). (2026). VII Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2025. En *Revista Ingeniería*, Volumen 36 NE6 (pp 1-255). Universidad de Costa Rica. Doi: 10.15517/ri.v36iNE6.5154.

Diseño de portada: Diana Catalina Quirós Murillo

Diagramación: Melissa González Villalobos.

CEDAA - INII - FI

TABLA DE CONTENIDOS

Presentación	VI
Acerca de este Volumen Especial de la Revista de Ingeniería	VIII
Acerca de las personas editoras de este Volumen Especial	X
Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental	1
Caracterización del biogás en una PTAR ordinaria y evaluación ambiental de su gestión potencial.....	2
Proyecciones Climáticas RCP para Ciudades de Costa Rica: Implicaciones para la Adaptación Urbana	10
Planificación urbana y análisis territorial	19
Dimensión física y percepción de personas usuarias en parques regionales: un abordaje metodológico mixto	20
El impacto de sistemas de infraestructura pública sobre el desarrollo urbano: agua potable y construcción de vivienda en la Gran Área Metropolitana	28
Diseño de los espacios urbanos desde una perspectiva gerontológica e inclusiva para Costa Rica	36
Movilidad segura y eficiente /Impacto del transporte	45
Análisis de Patrones de Movilidad Peatonal mediante Procesos Participativos	46
Interfaz de lenguaje natural para un sistema de información del transporte público	54
Análisis de movilidad activa para conectar las fincas 2 y 3 de la UCR	63
Evaluación del efecto sonoro producido en la operación de un tramo de Circunvalación Norte.....	71
Mejorando el acceso peatonal al Parque Metropolitano La Sabana a través de intervenciones a la infraestructura vial.....	79
Monitoreo/Investigación/Diseño	86
Registros de aceleración del 2019-2025	87
Adaptación de SeisComP al Monitoreo de Movimiento Fuerte en la Red Acelerográfica del LIS	96
Monitoreo a largo plazo de vibraciones de un edificio de gran altura	103
Diseño de un control por aceleración para RTHS basada en fuerza inercial.....	111
Dilución de materiales de referencia certificados para la producción de patrones sólidos en espectrometría de fluorescencia de rayos X	119
Método eléctrico y análisis mineralógico para identificar la saturación crítica en agregados finos	127
Prefactibilidad de un laboratorio del fuego que permita expandir los servicios del LAPCI	134
Contextualización de la expectativa hacia los graduados de ingeniería mecánica en habilidades de tolerancias y dimensionado geométrico (GD&T).....	141
Ingeniería aplicada en tecnologías de salud	150
Desarrollo de un Sensor de Temperatura con Redes en Fibra Óptica para Aplicaciones Biomédicas	151
Calidad de servicio de la cobertura celular en centros hospitalarios de Costa Rica.....	157
Control por Matriz Dinámica para el control de la anestesia y las variables hemodinámicas	166
Avances en ciencias de datos	174
Diseño de un sistema de comunicación OpenSource y de bajo costo para una Estación de Trabajo Experimental	175
De la Microestructura a la Mecánica: Algoritmos de Aprendizaje Profundo Predictivos y Generativos para el Modelado de Polisilicio	185
Validating Object Detection with Synthetic Data: Promising Practice or False Hope?	194
Comparación entre Dos Métodos de Cálculo en un Potenciostato Basado en Arduino UNO	203

Avances en Robótica y Automatización	211
Implementación y Validación de Algoritmos de Seguimiento de Trayectorias para un Robot Kinova de 7 Grados de Libertad (7DoF).....	212
Diseño, ensamblado, calibración e implementación de un sistema de control de Bola y Viga.....	221
Implementación de algoritmos de seguimiento de trayectorias para un robot manipulador y colaborativo	230
Control de tracción basado en estimación de fuerza normal para robots móviles sobre ruedas	238
Sintonización analítica de controladores PID más filtro para plantas de segundo orden	247

PRESENTACIÓN

Esta publicación corresponde a las ponencias presentadas en las VII Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería (7JIFI), 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 7JIFI fue **“La contribución de las investigaciones de la Facultad de Ingeniería al progreso del país”**, y las ponencias se agruparon en siete diferentes temas:

- Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental
- Planificación urbana y análisis territorial
- Movilidad segura y eficiente/impacto del transporte.
- Monitoreo/investigación/diseño
- Ingeniería aplicada en tecnologías de salud
- Avances en ciencias de datos
- Avances en robótica y automatización

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. Las ponencias, fueron revisadas y evaluadas por al menos dos pares externos al grupo organizador. De las 42 ponencias enviadas, 35 fueron aprobadas y presentadas en las 7JIFI; 26 de ellas corresponden a investigaciones a nivel de escuela: Arquitectura (2), Ciencias de la Computación e Informática (1), Ingeniería Civil (9), Ingeniería Eléctrica (7), Ingeniería Mecánica (4), Ingeniería Química (2) e Ingeniería Topográfica (1), y 9 ponencias corresponden a la investigación conjunta de docentes investigadores de diferentes escuelas: Ingeniería Civil-Ingeniería en Biosistemas-Ingeniería Industrial (1), Ingeniería Civil-Ingeniería Topográfica (1), Ingeniería Civil-Ciencias de la Computación e Informática-Ingeniería Eléctrica (1), Ingeniería Civil-Ingeniería Mecánica-Ingeniería Eléctrica (1), Ingeniería Mecánica-Ingeniería Eléctrica (3), Ingeniería Química-Ingeniería Eléctrica (1) e Ingeniería Industrial-Ingeniería Eléctrica (1). Varias de las investigaciones se realizan en el Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII), el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) y el Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES), algunas cuentan con la colaboración de universidades extranjeras y 2 corresponden al Doctorado Académico en Ingeniería.

Las 7JIFI se realizaron los días 29, 30 y 31 de octubre del año 2025 en el Miniauditorio 1 de la Facultad de Ingeniería, agrupando las ponencias en 8 sesiones considerando la cantidad y la temática, y se contó con la colaboración, como moderadores, de representantes de varias escuelas y de miembros de la organización. En esta ocasión se combinaron con el Encuentro de Investigación Doctorado en Ingeniería, en el marco del Décimo Aniversario del Doctorado Académico en Ingeniería, y con la actividad “Quiénes somos y hacia dónde vamos, en el marco del 20 aniversario de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES)”.

En estas Jornadas, la ponencia inaugural titulada: “Joby: Desarrollo a través de un modelo

de integración vertical” (“Joby: a vertically integrated approach to development”), fue presentada por el Ing. Santiago Morales Zamora M.Sc. de Joby Aviation, Inc.; y la mesa redonda final con el tema “85 años impulsando el desarrollo del país, un análisis autocrítico”, fue moderada por el Ing. Orlando Arrieta Orozco, Ph.D., ex decano de la Facultad de Ingeniería, y tuvo como participantes a la Química Alice Pérez Sánchez, Ph.D., Vicerrectora de Investigación de la Universidad de Costa Rica en el período 2012-2016, a la Microbióloga María Laura Arias Echandi, M.Sc., Vicerrectora de Investigación de la Universidad de Costa Rica en el período 2020-2024, y el Químico Gabriel Macaya Trejos, Ph.D., Rector de la Universidad de Costa Rica en dos períodos ubicados en los años 1996-2004.

Las Jornadas de Investigación siguen siendo un espacio muy importante para comunicar los resultados de la investigación de la Facultad de Ingeniería, dentro y fuera de la Universidad. La comunicación y la transferencia hacia la sociedad es vital para su valoración.

Editores del volumen especial:

Dr. Víctor Schmidt Díaz. Decano, Facultad de Ingeniería.

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

Dr. Orlando Arrita Orozco, Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica e investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería.

ACERCA DE ESTE VOLUMEN ESPECIAL DE LA REVISTA INGENIERÍA

Es una memoria de las VII Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, en la que se exponen las 35 ponencias que aprobaron las revisiones de pares, de formato y de plagio. Las jornadas se desarrollaron de forma presencial, los días 29, 30 y 31 de octubre de 2025.

Revisión de pares

Las ponencias enviadas para participar en las VII 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, centros, instituciones y empresas extranjeras y nacionales.

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)	Arq. Viviana Paniagua Hernández Ph.D.
Escuela de Ingeniería en Biosistemas (EIB)	Ing. María José Rodríguez Vásquez Ph.D.
Escuela de Ciencias de la Computación e Informática (ECCI)	Dr. Allan Berrocal Rojas.
Escuela de Ingeniería Civil (EIC)	Ing. Andrea Ramírez Villalba M.Sc.
Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE)	Ing. José David Rojas Fernández Ph.D.
Escuela de Ingeniería Industrial (EII)	Dra. Johanna Méndez Arias
Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM)	Ing. Juan Gabriel Monge Gapper Ph.D.
Escuela de Ingeniería Química (EIQ)	Ing. Lautaro Ramírez Varas Ph.D
Escuela de Ingeniería Topográfica (EIT)	M.Sc. Alexander Cerdas Hernández

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. 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. Fue director del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica en el período 2018-2025. Actualmente es el Decano de la Facultad de 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.

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. Fue Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica en los períodos 2018-2025. Actualmente es profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica e investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería.

Sostenibilidad, energías renovables y gestión ambiental

Caracterización del biogás en una PTAR ordinaria y evaluación ambiental de su gestión potencial

Characterization of biogas in a municipal WWTP and environmental assessment of its potential management

Erick Centeno Mora

Docente e investigador, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: : erick.centenomora@ucr.ac.cr

Nidia Cruz Zúñiga

Investigador Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES), UCR

e-mail: nidia.cruz@ucr.ac.cr

Paola Vidal Rivera

Doctorante de Ingeniería, UCR

e-mail: paola.vidal@ucr.ac.cr

Mauricio Bustamante Román

Docente e investigador Escuela de Ingeniería en Biosistemas, UCR

e-mail: mauricio.bustamante@ucr.ac.cr

Roberto Quirós Vargas

Docente e investigador Escuela de Ingeniería Industrial, UCR.

e-mail: roberto.quirosv@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Biogás, economía circular, reactor UASB, saneamiento sostenible, Simapro.

Keywords:

Biogas, circular economy, UASB reactor, sustainable sanitation, Simapro.

RESUMEN

Este estudio se enfoca en la caracterización del biogás producido en un reactor UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) situada de San José, Costa Rica, y en la evaluación de diversas estrategias para la gestión sostenible de este biogás, mediante la consideración de los impactos ambientales. La planta se seleccionó por el uso de tecnología anaeróbica, específicamente un reactor UASB. La investigación incluyó la medición del flujo y la composición del biogás generado, considerando la presencia de metano y sulfuro de hidrógeno. Además, se evaluaron los impactos ambientales globales de cuatro escenarios de gestión del biogás: emisión a la atmósfera, quema sin aprovechamiento, uso como sustituto del gas licuado de petróleo y generación de electricidad. El estudio concluye que la adopción de tecnologías de aprovechamiento

de biogás no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también ofrece beneficios económicos mediante la reducción del consumo de energía convencional.

ABSTRACT

This study focuses on the characterisation of biogas produced in a UASB reactor at a wastewater treatment plant (WWTP) located in of San José, Costa Rica, and on evaluating different strategies for the sustainable management of this biogas by considering its environmental impacts. The plant is characterised by its use of anaerobic technology, specifically a UASB reactor. The research included measuring the flow and composition of the generated biogas, specifically methane and hydrogen sulfide. Additionally, the environmental impacts of four biogas management scenarios were evaluated: emission to the atmosphere, burning without utilisation, use as a substitute for liquefied petroleum gas, and electricity generation. The study concludes that adopting biogas utilisation technologies not only contributes to environmental sustainability but also offers economic benefits by reducing conventional energy consumption.

I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales ordinarias o municipales en Costa Rica presenta un rezago considerable en cuanto a la inversión en infraestructura [1]. El porcentaje de población que utiliza tanque séptico con infiltración es muy alto, con más de 75% [1], lo que evidencia que esta técnica se ha generalizado en el país, aun en zonas urbanas o no aptas para su aplicación. A pesar de algunos esfuerzos gubernamentales que derivaron en la formulación de una Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales [2], al año 2024 los avances han sido muy limitados, y el país aún está muy lejos de lograr una cobertura en alcantarillado sanitario de, por lo menos, 80% de la población, según las metas planteadas para el 2015 [3]. Por este motivo, la búsqueda de modelos de saneamiento en aguas residuales sostenibles a nivel financiero, social y ambiental es más relevante que nunca.

En este sentido, la aplicación de tecnologías anaeróbicas para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias ha sido reiteradamente recomendada en la literatura para países de clima caliente como Costa Rica [4], [5]. En particular, el uso de reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodo (reactores UASB por sus siglas en inglés para *upflow anaerobic sludge blanket*) ha sido ampliamente adaptado en países como Brasil, México y Colombia, aunque su aplicación ha sido muy limitada en Costa Rica [3], [6]. Una de las ventajas de este tipo de reactor es que genera biogás, un gas combustible rico en metano que es aprovechable energéticamente para producir calor o electricidad, entre otras posibilidades.

El presente artículo tiene por objetivo caracterizar la producción de biogás en un reactor UASB en escala plena, utilizado en una planta tratamiento de aguas residuales (PTAR) ordinarias en San José, Costa Rica. Además, se busca evaluar posibles rutas de gestión de este subproducto (biogás), por medio de la estimación de los impactos ambientales globales atribuibles a cada escenario y mediante el uso de un software especializado en análisis de ciclo de vida (SIMAPRO).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales evaluada

La planta de tratamiento monitoreada es operada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA), y se ubica en Santa Ana, provincia de San José. La línea de tratamiento del agua está compuesta por un tratamiento preliminar (tamiz de tornillo de 4 mm), seguido de un desarenador, un reactor UASB y un postratamiento con lodos activados. El efluente tratado es descargado en una quebrada que colinda con la propiedad de la PTAR. El reactor UASB fue construido en los años 2000, mientras que el sistema de lodos activados fue instalado en el 2015. El caudal promedio diario del sistema durante el período de evaluación (abril del 2023 a mayo del 2024) fue de $256 \text{ m}^3/\text{d} \pm 50 \text{ m}^3/\text{d}$, proveniente de una zona residencial. Este caudal fue registrado por medio de un sensor electromagnético, a la salida de la PTAR. La Fig. 1 muestra una fotografía del reactor UASB. El sistema se encuentra cubierto por una geomembrana que permite coleccionar el biogás que sale por el compartimiento de decantación de la unidad.



Fig. 1. Reactor anaeróbico tipo UASB: (a) vista superior del reactor; (b) salida de gases (sello hidráulico) provenientes del separador trifásico y compartimiento de decantación; (c) medidor de biogás; (d) medidor de H_2S .

B. Métodos de medición y caracterización del biogás

La caracterización del biogás se realizó durante un año completo (abril 2023 a mayo 2024), midiendo el caudal de biogás generado y realizando análisis del contenido de CH_4 y H_2S de este subproducto. El biogás fue medido por medio de un sistema de diafragma, marca Elster, modelo BK-G4 (Fig. 1c). El biogás del interior del separador trifásico y del interior de la geomembrana fueron captados por medio de una tubería y conducidos hacia un sello hidráulico (Fig. 1b) que luego estaba conectado al medidor de gas. Este medidor es acumulativo, y la persona a cargo de la operación tomaba el dato indicado en el sistema cada día, generando un registro histórico. Con respecto a la caracterización del biogás, periódicamente se tomaban muestras de gas en una bolsa Tedlar de aluminio. Este gas era inyectado en un cromatógrafo GC/FID, marca Shimadzu, modelo GC-2014 para el análisis del contenido de CH_4 . El H_2S del biogás era medido en campo durante las visitas de inspección, por medio de un equipo de medición portátil, marca OdaLog, modelo G20 (Fig. 1d).

C. Escenarios considerados para la gestión del biogás

Los datos experimentales fueron aprovechados para alimentar un modelo de estimación de los impactos ambientales, comparando distintos escenarios de gestión del biogás. Los escenarios de gestión del biogás que se compararon en este estudio se presentan en la Fig. 2.

D. Metodología de cálculo de los impactos ambientales para los escenarios considerados

El impacto ambiental estimado para cada escenario se limitó únicamente al asociado a la descarga o aprovechamiento del biogás, sin considerar la fase constructiva ni el uso de materiales o reactivos para la operación de los procesos de tratamiento del biogás. Tampoco se consideró el impacto de la fase líquida o de gestión de los sólidos, al ser la misma para todos los escenarios comparados.

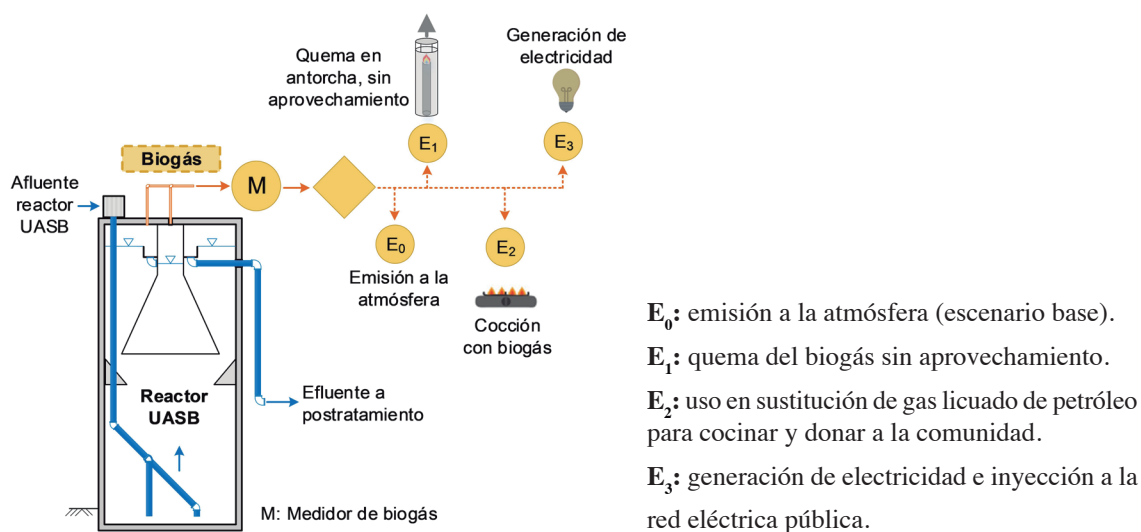


Fig. 2. Escenarios de gestión del biogás evaluados.

El Cuadro I presenta las consideraciones más importantes que se tomaron en cuenta para el modelo comparativo.

CUADRO I
CONSIDERACIONES PARA EL INVENTARIO DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Parámetro	Unidad	Valor / Rango
Ef. de combustión de CH ₄ en quemador (E ₁)	%	95
Ef. de combustión de cocina y de motor (E ₁)	%	99
Ef. energética de motor de combustión interna (E ₃)	%	35
Costo de energía eléctrica (tarifa residencial)	¢/kWh	105
Costo de LPG	¢/L	161

En el caso del aprovechamiento del biogás (E_2 y E_3), se consideró el potencial ingreso económico y el impacto ambiental que se tendrían con su implementación. Para los análisis comparativos se consideró como unidad funcional un metro cúbico de biogás generado en la PTAR.

Con respecto al cálculo de los impactos ambientales de cada escenario, se utilizó el software SIMAPRO versión 9.4.0.2. La base de datos para la conformación del inventario fue Ecoinvent 3. Para todos los escenarios se consideraron condiciones de Costa Rica cuando estaban disponibles en la base de datos (por ejemplo, la matriz eléctrica), o condiciones globales. Para la evaluación de los impactos ambientales se consideró el modelo Recipe 2016, de tipo *midpoint* con una perspectiva jerárquica, debido a su amplio uso en estudios de ACV con PTARs y acatando las recomendaciones de la literatura en la materia [7]. Este modelo permite calcular un total de 22 impactos a partir de los datos del inventario. A pesar de que se calcularon todos los impactos ambientales, solo se consideraron los más impactantes, y que han sido regularmente aplicados en ACVs en esta temática: calentamiento global, escasez de recursos fósiles y ecotoxicidad terrestre. Los otros impactos fueron muy bajos al considerar los efectos normalizados por medio del método de normalización integrado en Recipe 2016 (menos de 5% del impacto total).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Caracterización del biogás generado en la PTAR

La Fig. 3 sintetiza los datos de producción de biogás reportados en la PTAR de estudio, junto con el contenido de CH_4 y H_2S según los análisis realizados.

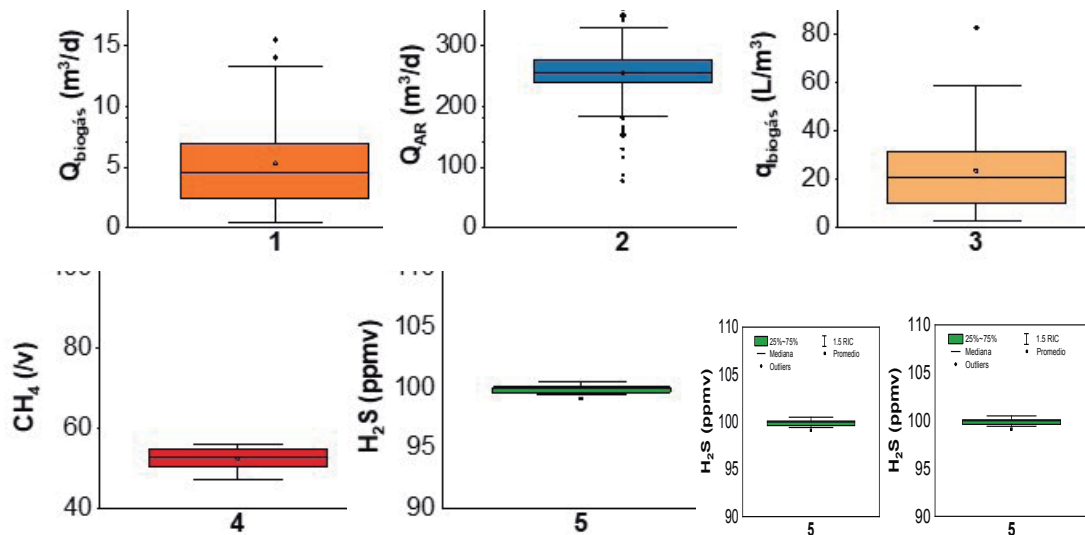


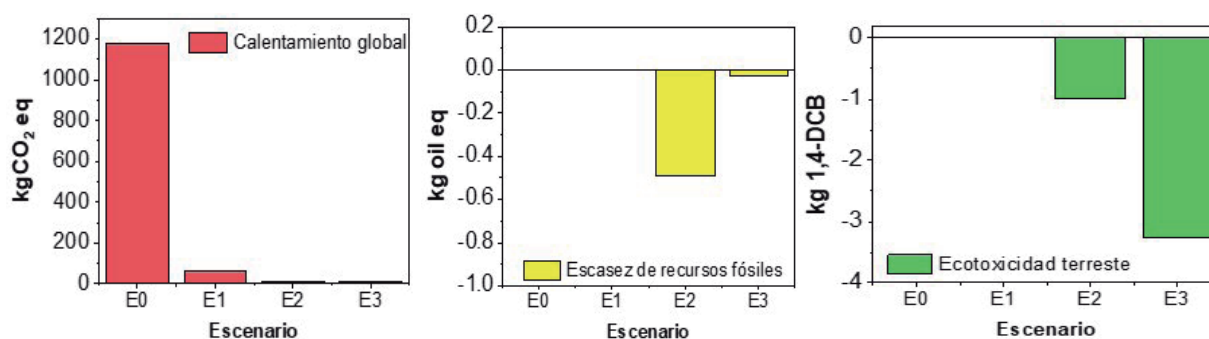
Fig. 3. Reporte de generación de biogás y contenido de CH_4 y H_2S en la PTAR evaluada: 1: caudal de biogás (m^3/d ; $n = 128$); 2: caudal de agua residual tratada (m^3/d ; $n = 139$); 3: índice de producción de biogás (L de biogás / m^3 de agua tratada; $n = 126$); 4: contenido de CH_4 (%v/v; $n = 12$); 5: contenido de H_2S (ppmv; $n = 14$).

La producción promedio de biogás en la PTAR de estudio fue de $5,3 \pm 3,6 \text{ m}^3/\text{d}$, con un caudal de agua residual tratado de $256 \pm 50 \text{ m}^3/\text{d}$. Esto generó un índice de generación de biogás de $21,0 \pm 15,6 \text{ L}$ de biogás/ m^3 de agua residual tratada. Además, el contenido de CH_4 y de H_2S fue de $53,1 \pm 3,7 \text{ \%v/v}$ y $99,0 \pm 3,1 \text{ ppmv}$, respectivamente. Las características del biogás medidas en la PTAR en evaluación fueron inferiores a las reportadas en la literatura. Por un lado, para reactores UASB tratando aguas residuales ordinarias algunos estudios reportaron un contenido de CH_4 en este tipo de sistemas de 70-85%v/v, con H_2S en el orden de 1000-2000 ppmv [8]. Además, la producción de biogás fue muy baja, considerando que la literatura indica un índice en torno de unos 16-80 L/m^3 de agua residual para condiciones pesimistas, y de 52-135 L/m^3 de agua residual en condiciones optimistas [9].

Al ahondar en la causa de esta divergencia, se sospecha que existen problemas estructurales en el reactor UASB, que podrían provocar que el biogás no esté siendo adecuadamente captado en el interior del separador trifásico, sino **más bien** que esté saliendo por el compartimiento de decantación. Esto estaría causando una dilución del biogás (lo que produciría concentraciones menores de CH_4 y H_2S), además de que muy posiblemente existe una pérdida importante de biogás, con el efluente líquido, y debido a fugas en la geomembrana.

B. Resultados del Análisis de Ciclo de Vida

A pesar de los problemas de la infraestructura, resulta de interés la evaluación de las posibles rutas de gestión del biogás. Para comparar las opciones se consideró una unidad funcional de 1 m^3 de biogás, con un contenido de CH_4 de 53,1 %v/v y de 99,0 ppmv de H_2S . La Fig. 4 muestra los resultados obtenidos para la evaluación de los distintos escenarios considerados.



E₀: emisión a la atmósfera (escenario base).

E₁: quema del biogás sin aprovechamiento.

E₂: uso en sustitución de gas licuado de petróleo para cocinar y donar a la comunidad.

E₃: generación de electricidad e inyección a la red eléctrica pública.

Fig. 4. Impactos ambientales principales para los distintos escenarios de gestión del biogás considerados.

La Fig. 4 muestra la importancia del impacto ambiental de calentamiento global para este sistema (el más significativo para todos los escenarios). En particular, se destaca la importancia de no emitir el CH_4 **a la atmósfera de forma descontrolada. Al quemar este metano, se reduce este impacto ambiental en casi 95%**. Cuando se aprovecha el biogás como fuente de energía alterna, este impacto se reduce en hasta 99%, debido al mejor control de combustión en esta situación, además de la sustitución energética. Por otro lado, el aprovechamiento del biogás también tiene ventajas para compensar otros impactos ambientales, pues la reducción del consumo de electricidad y de gas LPG representan una reducción de los impactos vinculados a la generación de estas fuentes de energía. En términos económicos, el uso del biogás en sustitución de gas LPG o de electricidad podría representar ahorros del orden de 209mil y 372mil colones anuales respectivamente, considerando la producción promedio de biogás de $5,3 \text{ m}^3/\text{d}$ medida en campo.

Este ahorro potencial y la disminución de los impactos ambientales ligados con el aprovechamiento del biogás se verían significativamente incrementados en caso de mejorar las condiciones de funcionamiento del reactor UASB, evitando el escape de biogás por el decantador secundario, lo que aumentaría la eficiencia de recuperación del biogás producido y evitaría su dilución.

CONCLUSIONES

Este estudio logró caracterizar la producción de biogás en un reactor UASB en una planta de tratamiento de aguas residuales en Costa Rica, y evaluó múltiples estrategias para la gestión sostenible de este subproducto mediante una estimación de los impactos ambientales. Se concluye que existen factores físicos y operativos que están influenciando el potencial de captura del biogás, y esto puede generar un problema para su potencial valorización. Los resultados destacan la importancia de la implementación de prácticas de manejo que no solo eviten la emisión descontrolada de CH_4 , sino que también promuevan su uso como fuente de energía renovable.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de las personas operadores y administradoras de las plantas de tratamiento de aguas residuales que facilitaron el lodo de PTAR utilizado en este trabajo, particularmente al señor Josué Martínez y al Ing. Ernesto Jiménez de AyA. Este trabajo fue desarrollado dentro del marco del proyecto C3608 de la Universidad de Costa Rica, con financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de esta Universidad. Asimismo, se agradece al Decanato de la Facultad de Ingeniería por el pago de la licencia anual del software SIMAPRO.

REFERENCIAS

- [1] D. Mora and C. F. Portuguese, “Agua para uso y consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2019: brecha al 2023,” San José, 2020.

- [2] AyA, MINAE, and MS, *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales 2016-2045*. San José, 2016.
- [3] E. Centeno Mora, N. Cruz Zúñiga y P. Vidal Rivera, “Tratamiento de aguas residuales ordinarias en Costa Rica: perfil tecnológico y perspectivas de sostenibilidad,” *Revista Ingeniería*, vol. 34, pp. 2215–2652, 2024.
- [4] E. Centeno Mora y A. Murillo, “Comparación de tecnologías para el tratamiento sostenible de aguas residuales ordinarias en comunidades de Costa Rica,” *Revista Ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 1–24, 2019.
- [5] E. Centeno Mora and V. Solano Ramírez, “Scenarios for the sewage treatment in Costa Rica towards a sustainable and universal sanitation,” in *XIV Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia (DAAL XIV)*, 2023.
- [6] E. Centeno Mora and A. Murillo Marín, “Tipología de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales ordinarias instaladas en Costa Rica,” *Revista de Ciencias Ambientales*, vol. 53, pp. 97–110, 2019.
- [7] L. Corominas *et al.*, “The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review,” *Water Research*, vol. 184, 2020.
- [8] J. Lopez Hernandez, J. Morgan-Sagatsume y C. Cabral Gomez, “Guía práctica de desulfuración biológica de biogás,” p. 108, 2019.
- [9] L. C. S. Lobato, C. A. L. Chernicharo y C. L. Souza, “Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater,” *Water Science and Technology*, vol. 66, pp. 2745–2753, 2012.

Proyecciones Climáticas RCP para Ciudades de Costa Rica: Implicaciones para la Adaptación Urbana

RCP Climate Projections for Cities in Costa Rica: Implications for Urban Adaptation

Estefanía Aguilar Navarro

Egresada, Escuela de Arquitectura, UCR

e-mail: estefania.aguilar@ucr.ac.cr

Jose Alí Porras-Salazar

Profesor Catedrático, Escuela de Arquitectura, UCR

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

Palabras clave:

Cambio Climático, Clima Tropical Húmedo, Resiliencia Urbana, Adaptación Climática.

Keywords:

Climate Change, Humid Tropical Climate, Urban Resilience, Climate Adaptation.

RESUMEN

Este estudio evalúa los cambios climáticos proyectados para Costa Rica bajo los escenarios RCP del IPCC, con un enfoque en las diez principales ciudades de los cantones más poblados del país. Se aplicó una metodología cuantitativa y prospectiva basada en proyecciones generadas con el software Meteonorm, utilizando dos trayectorias de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5) y tres horizontes temporales: 2030, 2050 y 2070. Se analizaron las variaciones en temperatura (mínima, media y máxima) y precipitación anual, variables clave para la clasificación de zonas de vida según Holdridge, utilizada en estándares de construcción sostenible como la INTE C170:2020. Los resultados revelan aumentos de temperatura entre 4 y 5.6 °C, particularmente en ciudades del Caribe y la región Norte, y posibles reducciones de precipitación en algunas zonas. Estas transformaciones climáticas podrían intensificar eventos extremos, comprometer la infraestructura urbana y demandar nuevas estrategias de adaptación para el desarrollo urbano sostenible en el trópico.

ABSTRACT

This study evaluates projected climate changes in Costa Rica under the IPCC's RCP scenarios, focusing on the ten largest cities within the country's most populated cantons. A quantitative, forward-looking methodology was applied using climate projections generated with the Meteonorm software, based on two greenhouse gas emission pathways (RCP4.5 and RCP8.5) and three time horizons: 2030, 2050, and 2070. Key variables analyzed include air temperature (minimum, mean, and maximum) and annual precipitation—critical for classifying life zones according to Holdridge, as outlined in Costa Rica's sustainable building standard INTE C170:2020. Results show temperature increases ranging from 4 to 5.6 °C, particularly in cities located in

the Caribbean and Northern regions, along with potential reductions in precipitation in certain areas. These climate changes could intensify extreme weather events, strain urban infrastructure, and necessitate new adaptation strategies to support sustainable urban development in tropical regions.

I. INTRODUCCIÓN

Las proyecciones climáticas a nivel mundial advierten que el cambio climático afectará de forma significativa los ecosistemas, la infraestructura urbana y la calidad de vida en las ciudades [1]. Costa Rica no es ajena a estos impactos y enfrentará alteraciones importantes en sus condiciones climáticas durante las próximas décadas [2]. De acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación [3], se estima un aumento en la temperatura en el corto plazo (2010–2039) bajo el escenario de altas emisiones RCP 8.5, siendo las regiones Caribe y Norte las más afectadas.

Estos cambios traerían consigo un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos, con impactos considerables en infraestructura crítica como carreteras, puentes y acueductos. Solo entre 2016 y 2020, las pérdidas por desastres alcanzaron los US\$820 millones [3]. Se estima que los costos derivados de estos eventos podrían alcanzar hasta un 2.5% del Producto Interno Bruto (PIB) [3]. A esta vulnerabilidad se suman factores estructurales como el diseño obsoleto, la falta de adaptación al clima y la carencia de una planificación territorial robusta.

Ante esta realidad, la planificación de infraestructuras resilientes se vuelve esencial. Si bien existen valiosos aportes en materia de modelación climática a escala regional, como los trabajos de [1] y [4], estos estudios suelen operar a una escala nacional o por cuencas, y no siempre incluyen referencias claras a ciudades o centros urbanos específicos. Esto dificulta su aplicación directa en procesos de planificación urbana y diseño arquitectónico.

Este estudio busca complementar dichos enfoques a través de una metodología accesible, que utilice herramientas accesibles y de fácil uso para generar proyecciones climáticas localizadas en las zonas urbanas. El objetivo, por lo tanto, es evaluar las proyecciones climáticas para Costa Rica bajo los escenarios RCP del IPCC y distintos horizontes temporales, con un enfoque en los cantones más poblados y densos del país. Para ello, se utilizaron proyecciones climáticas generadas mediante la herramienta Meteonorm, aplicando dos trayectorias representativas de emisiones de gases de efecto invernadero: un escenario intermedio (RCP4.5) y uno crítico (RCP8.5).

Los resultados proporcionan insumos clave para fortalecer la planificación urbana, promover infraestructuras resilientes y actualizar normativas ante el cambio climático. Asimismo, apoyarán la gestión de recursos hídricos y energéticos, la reducción de riesgos y la formulación de políticas públicas sostenibles, contribuyendo al bienestar y la salud pública al acercar la ciencia climática a la práctica profesional.

II. METODOLOGÍA

Este estudio sigue un enfoque cuantitativo y prospectivo para evaluar los cambios proyectados en el clima de Costa Rica bajo distintos escenarios de emisiones del IPCC y horizontes temporales. La metodología se desarrolla en cuatro etapas que se detallan a continuación.

A. Selección de Áreas de Estudio

Se seleccionaron los diez cantones más poblados de Costa Rica, considerados representativos del impacto potencial del cambio climático en áreas urbanas. La selección se basó en datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) [5], considerando también una distribución geográfica diversa a través de las zonas climáticas del país.

B. Definición de Escenarios Climáticos

Los escenarios climáticos históricos y proyectados se generaron utilizando las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), que simulan futuros escenarios climáticos basados en distintos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para este estudio, se utilizaron dos escenarios RCP de la quinta evaluación del IPCC: (i) RCP 4.5, un escenario de estabilización intermedia, y (ii) RCP 8.5, el escenario más crítico.

C. Generación de Datos Climáticos Típicos (TMY)

Se utilizó Meteonorm, un programa estocástico que genera archivos meteorológicos históricos y proyectados. Este software emplea archivos TMY, que representan un ‘año típico’ basado en promedios mensuales de variables meteorológicas durante 10 años. Para este estudio, se crearon archivos TMY para los años 2030, 2050 y 2070, bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, generando un total de 70 archivos meteorológicos para las principales ciudades de los diez cantones seleccionados.

D. Análisis de Tendencias Climáticas

Se analizaron las proyecciones climáticas para cada cantón, enfocándose en la temperatura del aire (mínima, media y máxima) y la precipitación anual, variables clave para caracterizar el clima y estimar zonas de vida según la clasificación de Holdridge, utilizada en estándares de construcción sostenible como la INTE C170:2020 [6]. Se compararon los datos históricos con los escenarios futuros para identificar tendencias generales de cambio climático.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cantones que cumplieron con los criterios de selección establecidos se presentan en la Tabla 1 e incluyen: Alajuela, Cartago, Heredia, Liberia, Limón, Pérez Zeledón, Pococí, Puntarenas, San Carlos y San José. Los resultados de las tendencias climáticas, detallados en la Tabla 2, muestran un aumento consistente en la temperatura promedio, mediana y máxima para todos los cantones analizados bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5 para los años 2030, 2050 y 2070. El incremento en la temperatura promedio varía entre 1.5 °C y 4.0 °C, dependiendo del cantón y del escenario, siendo particularmente marcado bajo el escenario RCP 8.5. Por ejemplo, en Liberia —el cantón con las temperaturas históricas más altas— se proyecta que la temperatura máxima podría aumentar de 35.5 °C a 40.5 °C en 2070 bajo RCP 8.5, un incremento de 5 °C. Esto

posiciona a Liberia como una zona de especial atención ante el riesgo de calor extremo. Incluso en cantones tradicionalmente más frescos, como Cartago y Heredia, se estiman aumentos significativos en las temperaturas máximas de hasta 5.0 °C para el mismo año, lo que indica un calentamiento generalizado, incluso en zonas de altitud elevada.

Bajo el escenario RCP 4.5, que contempla una estabilización moderada de las emisiones hacia mediados del siglo, también se proyectan incrementos relevantes en la temperatura. En Liberia, por ejemplo, la temperatura promedio podría aumentar en 4 °C hacia 2070. En cantones más templados como Cartago y Heredia, se estiman aumentos de 3.8 °C y 3.6 °C respectivamente. Estos cambios podrían alterar las condiciones térmicas que históricamente caracterizan a estas regiones, afectando la habitabilidad de los espacios urbanos y rurales, así como el confort térmico de la población.

En cuanto a la precipitación, las proyecciones muestran una alta variabilidad regional. Mientras que cantones como Cartago y Pérez Zeledón podrían experimentar aumentos significativos en la precipitación acumulada anual (por ejemplo, +851 mm en Pérez Zeledón para 2030 bajo RCP 4.5), otros como Liberia y Limón podrían registrar disminuciones sustanciales (hasta -979 mm en Liberia en el mismo escenario y año). Esta diversidad de impactos climáticos a nivel regional subraya la importancia de implementar políticas de adaptación diferenciadas, orientadas a las necesidades y vulnerabilidades particulares de cada cantón. La planificación territorial, la gestión de los recursos hídricos y la agricultura deberán ajustarse a estas nuevas condiciones para mitigar riesgos y garantizar la resiliencia de los sistemas locales.

Además, el aumento sostenido de la temperatura y la variabilidad en las lluvias representan una amenaza directa para el bienestar y la salud pública, especialmente en contextos urbanos, donde se incrementa el riesgo de golpes de calor, enfermedades vectoriales y deterioro de la calidad de vida. Estos resultados coinciden en términos generales con lo reportado por Alvarado-Gamboa [2], aunque en algunas ciudades se estiman aumentos de temperatura más pronunciados.

Por razones de espacio, este manuscrito no aborda la estacionalidad de las precipitaciones, que podría implicar una mayor concentración de lluvias en periodos más cortos. Finalmente, es importante señalar que los resultados deben entenderse como tendencias generales y no predicciones exactas a escala local. Los datos fueron generados mediante el software Meteonorm, que se basa en interpolaciones estadísticas y modelos globales, lo que introduce cierto grado de incertidumbre. Sin embargo, el uso uniforme de esta herramienta en todos los escenarios garantiza la comparabilidad de los resultados.

CUADRO II
CANTONES SELECCIONADOS SEGÚN CANTIDAD Y DENSIDAD DE POBLACIÓN

Cantón	Población principal	Localización		Población Total (Hab.)	Densidad Poblacional (hab/km ²)	Porcentaje Poblacional (%)	Región climática
		Latitud (°)	Longitud (°)				
Alajuela	Alajuela	10,03	-84,2	322,143	823	6.4	Valle Central
Cartago	Cartago	9,9	-83,9	165,417	594	3.3	Valle Central
Heredia	Heredia	10,0	-84,1	131,901	466	2.6	Valle Central
Liberia	Liberia	10,6	-85,4	80,130	56	1.6	Pacífico Norte
Limón	Limón	10,0	-83,1	116,457	66	2.3	Atlántico
Pérez Zeledón	San Isidro del General	9,3	-83,7	156,917	83	3.1	Pacífico Sur
Pococí	Guápiles	10,2	-83,8	146,320	67	2.9	Atlántico
Puntarenas	Puntarenas	10,0	-84,9	141,697	78	2.8	Pacífico Norte
San Carlos	Quesada	10,3	-84,4	198,742	59	3.9	Región Norte
San José	Carmen	9,9	-84,1	352,381	7,897	7.0	Valle Central

Nota: Se incluye la latitud, longitud y altitud de la ciudad principal. Estos datos fueron utilizados para generar los archivos meteorológicos. Se proporciona además la región climática en la que se ubican estas ciudades según la clasificación del IMN.

CUADRO II
TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN ANUAL PROYECTADAS EN DISTINTAS CIUDADES
PRINCIPALES DE COSTA RICA BAJO LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO RCP 4.5 Y
RCP 8.5 PARA LOS AÑOS 2030, 2050 Y 2070

Cantón- Ciudad principal	Escenario		Temp. Prom. (DE) (°C)	Mediana [RIC] (°C)	Mín-Máx (°C)	Precipitación (mm)	Máxima diferencia		
	RC ^p 1	Año					Temp. (Prom. Mediana Máxima) (°C)	Precipitación (mm)	
Alajuela- Alajuela	0.0	H	22.5 (2.25)	22.3 [20.2-24.7]	15.1-32.1	1,939	NA		
		2030	25.0 (2.25)	24.8 [22.6-27.1]	17.4-34.8	2,194			
	4.5	2050	25.5 (2.25)	25.3 [23.2-27.7]	18.0-35.3	2,128			
		2070	26 (2.3)	25.7 [23.6-28.2]	18.5-35.8	2,162	↑ 4.4 ↑ 4.4 ↑ 4.6	↑ 291	
		2030	24.9 (2.25)	24.7 [22.6-27.1]	17.3-34.7	2,230			
	8.5	2050	25.8 (2.25)	25.6 [23.5-28]	18.2-35.6	2,171			
		2070	26.9 (2.3)	26.7 [24.5-29.1]	19.3-36.7	2,053			
Cartago- Cartago	0.0	H	19.7 (2.1)	19.5 [17.6-21.8]	12.2-28.5	1,895	NA		
		2030	22.5 (2.1)	22.4 [20.4-24.6]	15.3-31.7	2,327			
	4.5	2050	23.1 (2.1)	23 [21-25.2]	16-32.2	2,270			
		2070	23.5 (2.1)	23.4 [21.4-25.6]	16.4-32.8	2,297	↑ 4.7 ↑ 4.7 ↑ 5.0	↑ 524	
		2030	22.4 (2.1)	22.3 [20.3-24.6]	15.2-31.6	2,419			
	8.5	2050	23.3 (2.1)	23.2 [21.2-25.5]	16.1-32.5	2,329			
		2070	24.4 (2.1)	24.2 [22.3-26.6]	17.3-33.5	2,225			
Heredia- Heredia	0.0	H	19.7 (2.1)	19.5 [17.6-21.8]	12.5-28.3	1,905	NA		
		2030	22.3 (2.2)	22.3 [20.1-24.5]	15.5-31.8	2,265			
	4.5	2050	22.9 (2.2)	22.8 [20.7-25.1]	16.1-32.4	2,202			
		2070	23.3 (2.2)	23.2 [21.1-25.5]	16.6-32.5	2,235	↑ 4.5 ↑ 4.7 ↑ 5.1	↑ 419	
		2030	22.3 (2.2)	22.2 [20.1-24.5]	15.3-31.9	2,324			
	8.5	2050	23.2 (2.2)	23.1 [21-25.4]	15.9-32.4	2,233			
		2070	24.2 (2.2)	24.2 [22-26.5]	17-33.4	2,119			

Liberia-Liberia	0.0	H	27.2 (2.5)	27.1 [24.7-29.7]	14.3-35.4	1,921	NA	
		2030	30.3 (2.5)	30.2 [27.8-32.9]	18.9-38.6	1,080		
	4.5	2050	30.8 (2.6)	30.7 [28.2-33.4]	19.4-39.1	1,013		
		2070	31.2 (2.5)	31.1 [28.7-33.8]	19.8-39.6	1,004	↑ 5.0 ↑ 4.9 ↑ 5.1	↓ 979
		2030	30.2 (2.6)	30.1 [27.6-32.8]	18.7-38.6	1,165		
	8.5	2050	31.1 (2.6)	30.9 [28.5-33.7]	19.6-39.5	1,033		
		2070	32.2 (2.6)	32 [29.6-34.8]	20.6-40.5	942		
0.0	H	25.1 (1.9)	25 [23.2-27.1]	16.7-31.2	3,362	NA		
	2030	27.8 (1.9)	27.7 [25.9-29.8]	19.6-33.9	2,650			
Limón-Limón	4.5	2050	28.3 (1.9)	28.3 [26.4-30.3]	20.2-34.5	2,601		
		2070	28.8 (1.9)	28.7 [26.9-30.8]	20.7-35	2,621	↑ 4.6 ↑ 4.6 ↑ 4.5	↓ 816
		2030	27.7 (1.9)	27.7 [25.8-29.7]	19.5-33.8	2,747		
	8.5	2050	28.6 (1.9)	28.6 [26.7-30.6]	20.4-34.7	2,661		
		2070	29.7 (2)	29.6 [27.7-31.7]	21.5-35.7	2,546		
0.0	H	22.2 (2.1)	22.1 [20.1-24.3]	14.3-30.5	1,972	NA		
Pérez Zeledón- San Isidro del General		2030	24.9 (2.1)	24.7 [22.8-27]	18.1-33.3	2,764		
	4.5	2050	25.4 (2.1)	25.3 [23.3-27.5]	18.2-34.3	2,728		
		2070	25.8 (2.1)	25.6 [23.7-27.9]	18.6-34.8	2,777	↑ 4.5 ↑ 4.5 ↑ 5.0	↑ 851
		2030	24.8 (2.1)	24.7 [22.7-27]	17.6-33.7	2,853		
	8.5	2050	25.7 (2.1)	25.5 [23.6-27.8]	18.4-34.6	2,815		
		2070	26.7 (2.1)	26.6 [24.6-28.8]	19.4-35.5	2,722		

Pococí-Guápiles	0.0	H	24.2 (2.3)	24.1 [21.9-26.5]	15.7-32.7	2,521	NA		
		2030	26.6 (2.3)	26.5 [24.3-28.9]	18.6-35.2	2,458			
	4.5	2050	27.3 (2.3)	27.2 [25-29.6]	18.8-36.1	2,403			
		2070	27.6 (2.3)	27.5 [25.3-29.9]	19.6-36.9	2,417	↑ 4.3 ↑ 4.4 ↑ 5.0	↓ 179	
		2030	26.5 (2.2)	26.5 [24.3-28.8]	18.1-35.4	2,547			
	8.5	2050	27.4 (2.2)	27.3 [25.2-29.7]	19-36.3	2,467			
		2070	28.5 (2.3)	28.5 [26.2-30.8]	20.4-37.7	2,342			
	0.0	H	26.9 (2.5)	26.9 [24.4-29.5]	17.5-35.9	1,598	NA		
	2030	28.9 (2.5)	28.8 [26.4-31.5]	19.6-38.6	1,486				
Puntarenas- Puntarenas	4.5	2050	29.5 (2.6)	29.4 [26.9-32.1]	20.1-39.2	1,425			
		2070	29.9 (2.5)	29.8 [27.4-32.5]	20.6-39.7	1,458	↑ 4.0 ↑ 3.8 ↑ 4.6	↓ 250	
		2030	28.9 (2.5)	28.7 [26.4-31.5]	19.4-38.6	1,558			
	8.5	2050	29.8 (2.6)	29.7 [27.2-32.4]	20.3-39.5	1,464			
		2070	30.9 (2.5)	30.7 [28.4-33.5]	21.4-40.5	1,348			
	0.0	H	22.4 (2.3)	22.2 [20.1-24.7]	13.9-31.6	1,838	NA		
San Carlos-Ciudad Quesada		2030	25.3 (2.3)	25.1 [23-27.6]	17.8-35	1,723			
	4.5	2050	25.9 (2.3)	25.7 [23.6-28.2]	18.4-35.6	1,663			
		2070	26.2 (2.2)	26.2 [24-28.5]	18.9-36.1	1,693	↑ 4.8 ↑ 4.9 ↑ 5.3	↓ 254	
		2030	25.3 (2.2)	25.1 [23.1-27.5]	17.7-34.9	1,793			
	8.5	2050	26.2 (2.3)	26.1 [23.9-28.5]	18.6-35.9	1,703			
		2070	27.2 (2.2)	27.1 [25-29.5]	19.7-36.9	1,584			

	0.0	H	20.9 (2.0)	20.8 [18.9-23]	13.6-29.5	1,912		NA
		2030	24.5 (2.0)	24.5 [22.5-26.6]	17.5-33.4	2,299		
	4.5	2050	25.1 (2.0)	25 [23.1-27.1]	18-34	2,242		
San José - Carmen		2070	25.5 (2.0)	25.4 [23.5-27.5]	18.5-34.5	2,269	↑ 5.6 ↑ 5.6	
		2030	24.4 (2.0)	24.4 [22.4-26.5]	17.4-33.4	2,366	↑ 5.8	↑ 454
	8.5	2050	25.4 (2.1)	25.3 [23.3-27.5]	18.3-34.3	2,279		
		2070	26.5 (2.0)	26.4 [24.5-28.5]	19.4-35.3	2,165		

¹ Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs, por el inglés Representative Concentration Pathways).

² H: Escenario basado en datos climáticos históricos.

CONCLUSIONES

Las proyecciones climáticas para Costa Rica, especialmente en los cantones más densamente poblados, evidencian un aumento significativo de las temperaturas y una mayor frecuencia de eventos extremos, particularmente en las regiones Caribe y Norte. Estos cambios incrementarán la vulnerabilidad de las infraestructuras urbanas y los costos asociados a su mantenimiento, reparación y adaptación. Este estudio ofrece proyecciones climáticas específicas para distintas ciudades mediante una metodología accesible, lo que brinda a urbanistas, arquitectos e ingenieros insumos clave para anticipar escenarios futuros y promover el diseño de infraestructuras más resilientes y sostenibles.

REFERENCIAS

- [1] “Summary for Policymakers,” in *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, 2023, pp. 3–34. doi: 10.1017/9781009325844.001.
- [2] L. F. Alvarado-Gamboa, “Proyecciones de Cambio Climático Regionalizadas para Costa Rica (Escenarios RCP-2.6 y RCP-8.5),” IMN-PNUD, 2021.
- [3] “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026,” Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente y Energía, 2022.
- [4] “Visor de Escenarios de Cambio Climático en Centroamérica.” Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://centroamerica.aemet.es/>
- [5] “Estimación de Población y Vivienda 2022: Resultados Generales.,” INEC, 2023.
- [6] *INTE C170:2020 RESET. Requisitos para Edificaciones Sostenibles en el Trópico*, San José, Costa Rica., 2020.

Planificación urbana y análisis territorial

Dimensión física y percepción de personas usuarias en parques regionales: un abordaje metodológico mixto

Characterization of biogas in a municipal WWTP and environmental Physical Dimension and User Perception in Regional Parks: A Mixed-Methods Approach

Karla Barrantes-Chaves

Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR

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

Erick Centeno-Mora

Docente e investigador, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: erick.centenomora@ucr.ac.cr

Nidia Cruz-Zúñiga

Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: nidia.cruz@ucr.ac.cr

Mariana Sánchez-Aguilar

Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR

e-mail: mariana.sanchezaguiar@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Parques regionales, planificación urbana, percepción, recreación.

Keywords:

Regional parks, urban planning, perception, recreation.

RESUMEN

El presente artículo sintetiza el abordaje metodológico utilizado en un proyecto de investigación interdisciplinario, que abordó la problemática de la valoración y estado actual de los tres principales parques regionales del área metropolitana de Costa Rica. Se abordó la investigación mediante una combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, que combinaron levantamiento de información en campo, mediciones de parámetros ambientales y consultas a personas usuarias; estas últimas mediante dos enfoques, uno cuantitativo con uso de encuestas masivas cerradas, y otro cualitativo mediante entrevistas abiertas en conjunto con caminatas guiadas y georeferenciación. Los resultados obtenidos reflejan que este tipo de enfoques compuestos contribuye mejor a entender realidades complejas como lo son el uso y percepción de personas usuarias de espacios públicos, y que, con estas metodologías y sus resultados se puede construir recomendaciones para mejorar la administración, planificación y crecimiento de los entornos urbanos propios del parque y sus alrededores.

ABSTRACT

This article summarizes the methodological approach used in an interdisciplinary research project that addressed the valuation and current state of the three main regional parks in the metropolitan area of Costa Rica. The study employed a combination of quantitative and qualitative methods, including field data collection, environmental parameter measurements, and consultations with park users. The latter was carried out through two approaches: a quantitative one using large-scale closed surveys, and a qualitative one involving open-ended interviews, guided walks, and georeferencing. The findings indicate that such mixed-method approaches are more effective in understanding complex realities, such as the use and perception of public spaces by users. Moreover, these methodologies and its results provide valuable input for improving the management, planning, and development of urban environments within and around the parks.

I. INTRODUCCIÓN

En Costa Rica existen pocos espacios públicos de gran tamaño dedicados al esparcimiento y la recreación, derechos fundamentales de todas las personas. Las políticas gubernamentales y la asignación presupuestaria a estos temas siempre han sido escasas en el país. El Instituto Costarricense de la Recreación y el Deporte ha sido la instancia encargada de velar por estos temas, y es la administradora de siete de los parques regionales que existen en Costa Rica, tres de ellos son los que se ubican en el área metropolitana y son los que abarcó el proyecto base de este trabajo. Este artículo tiene como objetivo exponer el proceso metodológico desarrollado en el marco del proyecto de investigación “*Efectos del COVID-19 en la percepción y los patrones de uso de los parques regionales de la Gran Área Metropolitana (GAM)*”, cuyos resultados permiten comprender las transformaciones en el vínculo entre la ciudadanía y estos espacios públicos a raíz de la pandemia. Los resultados obtenidos buscaron generar conocimiento sobre el papel que desempeñan estos parques para las personas que los visitan, así como evaluar su función como espacios articuladores de actividades sociales, culturales y deportivas. Este análisis se orientó a establecer vínculos con lo planteado en la literatura especializada respecto al rol de los espacios verdes urbanos y su contribución al bienestar colectivo [1], [2], [3].

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta buscaba contestar la pregunta de investigación ¿Cuáles son los patrones de uso y percepción de personas usuarias de los parques regionales de la GAM en la postpandemia? El diseño metodológico adoptó un enfoque mixto, integrando datos cuantitativos y cualitativos generados a lo largo del estudio. Esta estrategia permite evidenciar y comprender los cambios en los patrones de uso de estos espacios.

A. Etapa I: Logística y preparación

Tanto las fases cualitativas como cuantitativas incluyeron protocolos de interacción con personas participantes, por lo tanto, dentro de las consideraciones éticas se encontró la aprobación del Comité Ético Científico (CEC) de la Universidad de Costa Rica. Para ello se elaboraron documentos

para obtener el consentimiento informado (por parte de las personas participantes adultas) y el asentimiento informado (para el caso de los menores de edad). En el caso de la encuesta se adaptó un breve consentimiento al inicio en la plataforma para que la persona lo aprobara. Se estableció una articulación metodológica que relacionó las características físicas del entorno con la percepción de las personas usuarias y las perspectivas de las personas administradoras de los parques (Ver Fig.1). Esta triangulación permitió contrastar los datos obtenidos en la caracterización física con los perfiles de usuarios y las visiones aportadas por las personas encargadas de la gestión de los espacios.

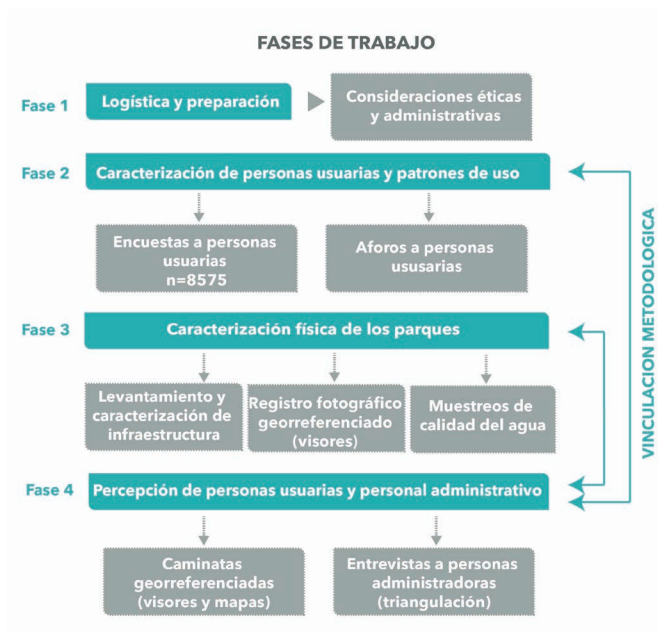


Fig. 1. Fases de trabajo y su vinculación.

B. Etapa II: Recolección de datos

A. Caracterización de personas usuarias y patrones de uso

A. Encuestas a personas usuarias de los parques.

Entre marzo y agosto de 2023 se aplicaron encuestas directas a personas usuarias de parques, mediante un cuestionario de preguntas cerradas. La participación fue voluntaria y se realizó a través de un muestreo dirigido a las personas presentes en los parques durante los horarios de visita del grupo investigador. Las personas encuestadas tenían 14 años o más; en el caso de la población adolescente, se completó adicionalmente un formulario de asentimiento informado como se indicó.

El cuestionario abordaba temas como procedencia, movilidad hacia el parque, frecuencia y motivos de visita, evaluación de las instalaciones y percepción del parque. La recolección de datos fue realizada por estudiantes, quienes entrevistaban directamente a personas usuarias y registraban

sus respuestas en un formulario en línea. Todo el proceso fue supervisado por asistentes de investigación o directamente por los investigadores. Finalizada la recolección, se depuró la base de datos eliminando respuestas inválidas, llegando a una muestra total válida de 8575 personas. Esta metodología permitió recopilar información valiosa y actualizada sobre el perfil y la experiencia de visitantes en los parques urbanos seleccionados.

B. *Conteos: aforos de visitantes de los parques.*

Durante febrero y marzo de 2023 se realizaron aforos en distintos días de la semana, con el fin de tener representatividad de una semana típica. En el caso del Parque La Paz y del Parque la Sabana, que son espacios abiertos, los conteos se efectuaron mediante un “cinturón” de personas aforadoras ubicadas en puntos clave alrededor del perímetro abierto al público de cada parque. Cada aforador registraba los ingresos, en horarios de 8:00 a.m. a 5:00 p.m., clasificando las personas por edad y sexo, evitando contar múltiples veces a personas que pasaban reiteradamente por el mismo punto. Las salidas no fueron registradas. Los datos se organizaron en bloques horarios de una hora para analizar la variación a lo largo del día. En el parque El Este, al tenerse un único punto de ingreso, se facilitó el conteo. En el parque La Paz, por razones de seguridad, no se pudo cubrir todo el perímetro, aunque se confirmó que la zona excluida tenía baja afluencia.

B. *Caracterización física de los parques*

A. *Levantamiento y caracterización de infraestructura y visor fotográfico.*

Se desarrollaron levantamientos de todas las estructuras localizadas dentro de los parques regionales, incluyendo edificaciones y mobiliario urbano. Su estado físico y funcional se evaluó mediante fichas técnicas [4]. La infraestructura vial interna, como calles y aceras, fue valorada considerando accesibilidad y condiciones estructurales de forma integral según Vega-Padilla [5]. Para ambas actividades se usaron dispositivos móviles con la aplicación *Qfield*, integrando las fichas de evaluación directamente en tablas de atributos de archivos geoespaciales en formato *Shapefile*, correspondientes a cada estructura inventariada, facilitando la posterior generación de mapas con la información recopilada. Además, se realizaron recorridos de campo en los tres parques regionales para obtener registros fotográficos de la infraestructura, mobiliario y paisaje, con el fin de contrastar los resultados técnicos con la percepción de personas usuarias. Esto se hizo con la app *Locus Map*, que permitió registrar *tracks* y capturar fotografías georreferenciadas simultáneamente. Luego, los datos registrados fueron importados a QGIS, donde se creó un visor interactivo con el complemento *qgis2web*, mostrando 512 puntos georreferenciados, cada uno vinculado a su fotografía, representando diversas estructuras y elementos paisajísticos de los tres parques regionales.

B. *Muestreo de calidad de cuerpos de agua.*

Se realizaron cuatro campañas de muestreo en los lagos de los parques La Sabana y La Paz, con cuatro puntos considerados en el lago de La Sabana y dieciséis en La Paz, que incluye tres cuerpos de agua distintos (lago pequeño, lago norte y lago sur). Las campañas se llevaron a cabo durante la

estación lluviosa en julio y septiembre de 2023, y en junio-julio y octubre de 2024, ya que en la estación seca los lagos carecen de agua al depender únicamente de la lluvia y escorrentía superficial del parque.

En cada campaña se midieron parámetros fisicoquímicos in situ como temperatura, pH, potencial redox, conductividad, turbidez, oxígeno disuelto y sólidos totales disueltos, mediante un sensor multiparámetro (Horiba, modelo U-50). También se recolectaron muestras compuestas para análisis de laboratorio, donde se determinaron parámetros como DBO, DQO, sólidos totales y suspendidos (totales y volátiles), amonio, nitrito, nitrato, fosfato y coliformes fecales, siguiendo los métodos estándar de análisis de agua [6]. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica, utilizando botellas estériles de dos litros y manteniéndose a 4 °C hasta su análisis.

C. *Percepción de personas usuarias y personal administrativo*

A. *Caminatas georreferenciadas.*

Se llevaron a cabo dos caminatas exploratorias por cada uno de los tres parques, una con personas adultas y otra con personas adultas mayores, esta última población arrojó patrones muy particulares de uso en la etapa cuantitativa [7], razón por la cual se decidió realizar caminatas especializadas para estas personas. Las caminatas exploratorias fueron georreferenciadas y sincronizadas con las grabaciones de audios [8], para posteriormente generar mapas de percepción del entorno [8]. Estos incluyeron aspectos relacionados con la interacción con los parques, la percepción de seguridad, el entorno, la infraestructura, el mantenimiento, la visión posterior a la pandemia y las aspiraciones respecto al uso y disfrute de estos espacios. La ruta de un recorrido en cada parque involucró el paso por diferentes zonas, con estructuras e infraestructura de distintos estados, según lo observado con la caracterización física realizada en la etapa anterior. Adicionalmente, cada participante indicó su percepción de seguridad durante el día y la noche en las caminatas exploratorias por medio de *stickers* [8]. Las personas participantes se reclutaron mediante el contacto con grupos organizados y referenciados por las personas administradoras del parque.

B. *Entrevistas a personas administradoras.*

Se realizaron entrevistas con personas administradoras de cada uno de los parques, las cuales constituyeron un valioso insumo para la triangulación de la información obtenida a través de la caracterización física y las caminatas exploratorias con la comunidad. Esto se debe al profundo conocimiento y al grado de injerencia que estas personas poseen sobre la gestión y funcionamiento cotidiano de los parques.

C. *Etapa III: Procesamiento y análisis.*

A. *Encuestas.*

El análisis de los datos se llevó a cabo utilizando el software RStudio. Primero se realizó un análisis descriptivo mediante distribuciones absolutas, proporcionales y porcentuales para cada

una de las preguntas del cuestionario. Para representar visualmente la distribución porcentual, se empleó la librería ggplot2. Posteriormente, se construyeron tablas cruzadas entre las variables identificadas como más relevantes por el equipo de investigación, sobre estas tablas se aplicaron pruebas de independencia mediante el estadístico Chi-cuadrado (`chisq.test`), utilizando un valor de significancia de $p = 0.05$, con el propósito de determinar la existencia de relaciones significativas entre las variables analizadas.

B. Calidad del agua

Se calcularon valores promedio para cada lago y campaña de muestreo con el fin de facilitar la interpretación de los datos. Estos valores se compararon con la normativa local vigente [9], la cual establece los criterios de calidad del agua para usos recreativos en Costa Rica que implican contacto primario con los usuarios. Esta comparación permitió evaluar el cumplimiento de los lagos con respecto a los límites establecidos para actividades recreativas, proporcionando una base objetiva para relacionar las condiciones físicas del agua con la percepción de las personas usuarias en los parques estudiados.

C. Análisis cualitativo

En las caminatas-entrevista, el registro del recorrido se realizó por medio de tracks (rastros de plática) con la aplicación Locus Map, la conversación fue transcrita y codificada mediante análisis temático [10], que permite establecer patrones a partir de la narrativa. Estos códigos fueron georreferenciados utilizando el tiempo exacto de cada punto del track, esta información se empleó para la generación de mapas de percepción del entorno, mientras que con los mapas con stickers se generaron mapas de percepción de seguridad de las personas participantes [8].

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante esta metodología permitieron un abordaje integral que articuló la dimensión física de los parques regionales de la GAM con la percepción de sus personas usuarias. La Figura 2 presenta un ejemplo del proceso de codificación realizado a partir de las caminatas exploratorias, en el que se destacan dos de los temas más discutidos, clasificados según género y grupo etario, así como un mapa generado a partir de esta codificación georreferenciada. La percepción registrada en estos mapas se contrasta con otros que reflejan el estado físico de las zonas evaluadas y con visores fotográficos que permiten identificar elementos del entorno que podrían provocar respuestas emocionales en las personas usuarias. Esto posibilita identificar posibles brechas entre la percepción del espacio y las condiciones físicas observadas en los levantamientos técnicos. Por otra parte, los muestreos de cuerpos de agua permitieron conocer el cumplimiento de límites establecidos para actividades recreativas en contraste con la percepción que la población tenía sobre los lagos y otros cuerpos de agua como espacios de convivencia.

Una de las mayores fortalezas de esta metodología es la precisión en la captura de datos cualitativos y su articulación con datos cuantitativos que eventualmente permitirán a las instituciones tomar acciones estratégicas de inversión.

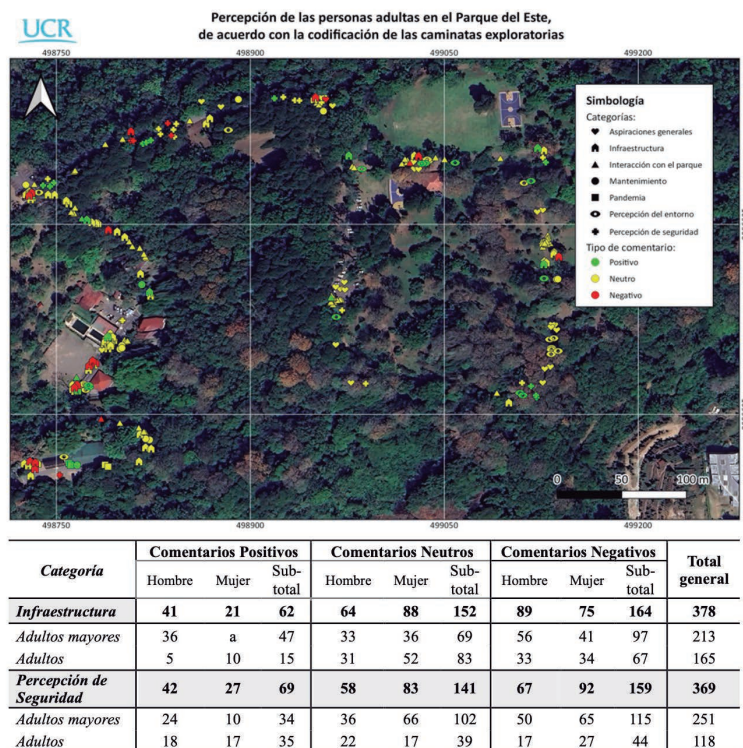


Fig. 2. Mapa de percepción del entorno junto con un ejemplo de codificación para dos categorías.

CONCLUSIONES

El proceso metodológico, basado en un enfoque mixto que integró datos cuantitativos y cualitativos, fue el resultado de un trabajo interdisciplinario que involucró las disciplinas de Ingeniería Topográfica, Ingeniería Civil y Arquitectura. Esta aproximación permitió, en una primera fase, identificar los perfiles de las personas usuarias de los parques regionales de la Gran Área Metropolitana (GAM) en el contexto pospandémico, a través de la aplicación de encuestas. A partir de este análisis cuantitativo, se profundizó en la dimensión cualitativa, lo que facilitó la selección intencionada de perfiles de personas usuarias para una segunda etapa del estudio. En cuanto a la caracterización física, fue posible contrastar los levantamientos y muestreos objetivos con la percepción que las personas usuarias tienen sobre la infraestructura y los elementos que inciden en su sensación de seguridad. De este modo, la metodología empleada permitió captar con mayor profundidad los matices y la complejidad de los patrones de visitación y percepción en torno a los parques regionales de la GAM.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, por el financiamiento mediante el fondo de Apoyo a la Mujer en Investigación, al TC727 por su apoyo en labores de campo, a asistentes de investigación del proyecto y a los grupos comunales participantes.

REFERENCIAS

- [1] M. P. White, I. Alcock, B. W. Wheeler, and M. H. Depledge, "Would You Be Happier Living in a Greener Urban Area? A Fixed-Effects Analysis of Panel Data," <https://doi.org/10.1177/0956797612464659>, vol. 24, no. 6, pp. 920–928, Apr. 2013, doi: 10.1177/0956797612464659.
- [2] A. Chiesura, "The role of urban parks for the sustainable city," *Landsc Urban Plan*, vol. 68, no. 1, pp. 129–138, May 2004, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2003.08.003.
- [3] M. Heckert and A. Bristowe, "Parks and the Pandemic: A Scoping Review of Research on Green Infrastructure Use and Health Outcomes during COVID-19," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 18, no. 24, Dec. 2021, doi: 10.3390/IJERPH182413096.
- [4] K. Barrantes-Chaves, N. Cruz-Zúñiga, and E. Centeno-Mora, "Desafíos de la accesibilidad micro y macro en los parques regionales urbanos de Costa Rica.," in *VIII Congreso internacional ISUF-H Valencia 2024. Formas urbanas diversas para espacios en recomposición*, ISUF-H, Ed., 2024, p. Valencia. Accessed: Apr. 02, 2025. [Online]. Available: https://drive.usercontent.google.com/download?id=1RGd7cTQ4D8F2cbVUFVvK-hdnAW19MGb_W&export=download&authuser=0
- [5] H. Vega Padilla, D. Hernández Vega, J. D. Jiménez Romero, A. Rodríguez Morera, Ulate Castillo, and L. G. Loría Salazar, "Guía de Inventario y Evaluación de aceras Contenido," San Pedro, 2017. Accessed: May 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1699>
- [6] AWWA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. Washington D.C: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF)., 2012.
- [7] K. Barrantes-Chaves, N. Cruz-Zúñiga, and E. Centeno-Mora, "Cambios en el uso de parques regionales: una mirada en la postpandemia COVID-19 costarricense," *Ingeniería*, vol. 35, no. 1, pp. 53–71, Dec. 2024, [Online]. Available: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/59303>
- [8] K. Barrantes-Chaves, "Emotional cartography of urban fear: Methodological approach to analyse the relationship between built environment and fear of crime," *MethodsX*, vol. 14, p. 103316, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.MEX.2025.103316.
- [9] DE-33903-MINAE-S, *Reglamento Para La Evaluación y Clasificación de La Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*. San José, 2007.
- [10] V. Braun and V. Clarke, "Using thematic analysis in psychology," *Qual Res Psychol*, vol. 3, no. 2, pp. 77–101, 2006, doi: 10.1191/1478088706qp063oa.

El impacto de sistemas de infraestructura pública sobre el desarrollo urbano: agua potable y construcción de vivienda en la Gran Área Metropolitana

The impact of public infrastructure systems on urban development: drinking water and housing construction in the San José Metropolitan Region

Eduardo Pérez Molina

Profesor asociado e investigador, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano

Sostenible y Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: eduardo.perezmolina@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Agua potable, Acueducto, Causalidad de Granger, Desarrollo urbano, Infraestructura, San José-Costa Rica.

Keywords:

Drinking water, Granger causality, Infrastructure, San José-Costa Rica, Urban development, Water supply.

RESUMEN

En este trabajo, se explora la hipótesis de que las limitaciones al abastecimiento de agua potable reducen el crecimiento urbano en la GAM. Para ello, se relacionan datos de permisos de construcción con producción de fuentes del acueducto metropolitano y precipitación. Se construyeron modelos de vectores autorregresivos con series temporales del acueducto metropolitano de San José y del acueducto de la ESPH en Heredia, para establecer relaciones de causalidad de Granger entre la precipitación en las fuentes, la producción de agua potable y el desarrollo urbano. Se encontró que el desarrollo urbano, tanto en Heredia como San José, influye significativamente ($p < 0.01$) sobre la producción de agua; pero la influencia de la producción de agua sobre desarrollo urbano solo es estadísticamente significativa ($p < 0.01$) cuando se consideran viviendas y no costos totales de construcción (i.e., el efecto no parece ser sobre la inversión).

ABSTRACT

This work explores the hypothesis that drinking water availability constraints decrease urban growth in the San Jose metropolitan region. This hypothesis is explored relating data of building permits with water intake volume and precipitation. Vector autoregression models were estimated, for the San José and Heredia water supply systems, to establish Granger causal relations between precipitation, drinking water availability, and urban development. Urban development was found to significantly ($p < 0.01$) impact water production; but the effect of water intake volume on building was only statistically significant ($p < 0.01$) for housing units and not for building costs (i.e., there is no effect over investment).

I. ANTECEDENTES

Durante la última década, el área metropolitana de San José ha sufrido recurrentes problemas de desabastecimiento por agua potable [1]; actores clave del sector privado han sugerido que estas limitaciones restringieron inversiones y desarrollo económico en la ciudad [2]. Resulta claro que el problema de abastecimiento se debe en parte a una tendencia de insuficiente inversión en el acueducto metropolitano [3] y posiblemente esté asociada a eventos extremos de bajas precipitaciones [4].

En este contexto, se ha planteado una serie de preguntas de investigación para derivar lecciones del caso en estudio. ¿Ha disminuido el nivel de desarrollo urbano en respuesta a problemas de abastecimiento de agua? ¿Existe alguna relación de retroalimentación entre el nivel de desarrollo urbano y la inversión en infraestructura de agua potable en la GAM? ¿Hasta qué punto influye el clima sobre las dinámicas urbanas involucradas?

La exploración de las preguntas de investigación permiten avanzar en distintas líneas de reflexión. Primero, el concepto de sistemas naturales y humanos acoplados [5] fue desarrollado para conceptualizar relaciones de retroalimentación entre sistemas humanos y naturales; derivado de él, la sociohidrología [6] fue propuesta para endogeneizar la respuesta humana ante eventos en sistemas hidrológicos y sus consecuencias sobre el medio ambiente. El análisis que se propone busca evaluar la importancia de una relación de retroalimentación: la sensibilidad del desarrollo urbano ante la disponibilidad de agua potable, que a su vez configura a largo plazo la demanda por agua potable, implicando una abstracción de agua de los sistemas hidrológicos (particularmente los acuíferos de Barva y Colima superior e inferior).

Como segundo punto, es importante considerar el análisis propuesto en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas [7], específicamente los objetivos 6 (agua potable y saneamiento) y 11 (ciudades y comunidades sostenibles). La meta 11.1 de los ODS busca garantizar acceso a servicios públicos a toda la población, incluidos los más pobres y la 11.5, la reducción de muertes por desastres (que incluyen sequías así como pandemias como la reciente de COVID-19); la meta 6.1 explícitamente busca “[d]e aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos” [7]. En ambos casos, existe un énfasis sobre la equidad en el acceso al agua potable.

Un tercer campo de gran importancia corresponde a la investigación en atribución causal, que ha sido especialmente desarrollado para identificar eventos extremos originados por el cambio climático [8] y en el que también ha habido avances en la evaluación de programas de políticas públicas [9]. El problema de causalidad es especialmente complejo cuando existe retroalimentación, pues la reciprocidad viola los supuestos de un experimento [10] (que son la norma en la determinación de relaciones causales). En el marco de esta discusión, Shipley [11] ha sugerido que la retroalimentación no existe, pues la causalidad ocurre en el tiempo. Dada la relación conceptualmente recíproca entre A y B , lo que en estricto rigor sucede es que A_{t-1} influye sobre B_t y B_{t-1} , sobre A_t . Este esquema coincide con un enfoque de evaluación causal aplicado en la econometría de series temporales desde hace décadas: el método de causalidad de Granger [12] que se ha empleado en este trabajo (el desarrollo de este enfoque puede consultarse en la sección II).

Por último, y acaso de forma más central, este trabajo busca contribuir a las reflexiones sobre financiamiento de infraestructura. Como plantean Glaeser y Poterba [13], es económicamente óptimo para un proyecto de infraestructura que los usuarios paguen el costo medio de la inversión como tarifa; sin embargo, esta tarifa es ineficiente si el costo medio es mucho mayor que el costo marginal del proyecto [13]. Adicionalmente, en el caso del agua potable, existe una contradicción entre el pago óptimo por la inversión desde el punto de vista de la eficiencia y de la equidad, puesto que los sectores más pobres de la sociedad muchas veces carecen de suficientes ingresos para acceder al recurso (y su eventual exclusión invalida muchas externalidades positivas que justifican la inversión pública en infraestructura de agua potable). Una opción que ha tomado gran relevancia en el financiamiento de infraestructura pública es el cobro de plusvalías [13], [14]; gran parte de la experiencia mundial en el desarrollo e implementación de estos instrumentos de gestión de suelo se ha concentrado en América Latina, con un alto grado de efectividad en contextos institucionales similares al costarricense [14].

Con el fin de analizar la relación entre desarrollo urbano e infraestructura de agua potable en la GAM, en el marco de los antecedentes discutidos: (a) se compilaron series de tiempo mensuales de producción de agua potable en el acueducto metropolitano y el acueducto de la ESPH [15] para 2010-2020, de permisos de construcción en la GAM [16] para estimar la cantidad de unidades habitacionales construidas en el área de cobertura de cada acueducto¹ y el costo total de las construcciones, y de precipitación a partir de datos del producto geoespacial CHIRPS [17]; (b) se describieron estas series temporales en función de sus propiedades (orden de integración y estadística descriptiva); (c) se estimaron modelos de vectores autorregresivos, con el fin de establecer la significancia estadística de relaciones causales entre variables recíprocas (producción de agua en el acueducto, que es función de la infraestructura, y nivel de desarrollo urbano medido a través de la cantidad de viviendas y el costo de construcción), controlando también por niveles de precipitación (considerados exógenos al sistema).

II. METODOLOGÍA

El punto de partida de este trabajo es la hipótesis de que existe una relación de retroalimentación entre crecimiento urbano e infraestructura de agua potable: el crecimiento urbano implica mayor actividad humana, que a su vez representa una mayor demanda por agua potable. La disponibilidad de agua potable es función de la inversión en infraestructura para extraer suficiente volumen de agua que satisfaga la demanda (suponiendo que exista suficiente recurso hidráulico, lo cual es función del tiempo). Por otra parte, la disponibilidad de agua potable es requisito indispensable para un mayor crecimiento urbano (incluyendo la necesidad explícita de que en el sitio donde se emita un permiso de construcción debe existir capacidad de abastecimiento de agua potable para satisfacer el nuevo desarrollo [2]). Se ha planteado así el siguiente sistema de ecuaciones para explorar la causalidad entre estas dos variables:

1 El área de cobertura del acueducto metropolitano incluye los cantones de San José, Escazú, Desamparados, Mora, Goicoechea, Santa Ana, Alajuelita, Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat, El Guarco y San Pablo; para el acueducto de la ESPH, tres cantones fueron incluidos (Heredia, San Rafael y San Isidro).

$$DU_t = \mu_1 + \sum_1^r (\alpha_{1,t-r} \cdot AP_{t-r}) + \sum_1^r (\beta_{1,t-r} \cdot DU_{t-r}) + \gamma_1 \cdot P_t + \varepsilon_{1,t} \quad (1)$$

Z

$$AP_t = \mu_2 + \sum_1^r (\alpha_{2,t-r} \cdot AP_{t-r}) + \sum_1^r (\beta_{2,t-r} \cdot DU_{t-r}) + \gamma_2 \cdot P_t + \varepsilon_{2,t} \quad (2)$$

donde DU_t es el desarrollo urbano, AP_t es el agua potable y P_t es la precipitación durante el periodo t ; las ecuaciones (1) y (2) incluyen r rezagos (valores de periodos anteriores) para AP y DU – la cantidad de estos rezagos habiendo sido seleccionada para maximizar el criterio de información de Akaike (AIC), que evalúa la calidad del conjunto de modelos de regresión estimados.

Se han estimado cuatro versiones de este modelo: dos de ellas corresponden al acueducto metropolitano (de San José) administrado por AyA y dos, al acueducto de Heredia administrado por la ESPH. En todos los casos, AP corresponde al volumen de agua suministrado por el acueducto; para un modelo cada uno de San José y Heredia, se han considerado para representar el desarrollo urbano: las unidades habitacionales totales construidas y el costo de todas las construcciones realizadas en el área de cobertura de cada acueducto. Para controlar por la precipitación, se incluyeron dos variables en los modelos correspondientes a AyA (precipitación total mensual en el embalse de Río Macho y en los pozos de Puente de Mulas) y una para los modelos del sistema de la ESPH (precipitación mensual en San Isidro de Heredia). Las series temporales mensuales corresponden al periodo enero de 2010 a diciembre de 2020.

La prueba estadística de causalidad de Granger está basada en la transmisión de información; se considera que existe una relación causal de AP sobre DU si la predicción de DU_t es mejor incluyendo los rezagos tanto de AP como de DU que la predicción que incluya solo los rezagos de AP (y viceversa). Formalmente, la prueba de hipótesis con $H_0: \alpha_{t-1} = \alpha_{t-2} = \dots = \alpha_{t-r}$ vs. $H_A: \sim H_0$, donde los coeficientes α_i fueron estimados en la ecuación (1), permite determinar si existe un efecto causal de AP sobre DU ; la prueba de hipótesis $H_0: \beta_{t-1} = \beta_{t-2} = \dots = \beta_{t-r}$ vs. $H_A: \sim H_0$, donde los coeficientes β_i fueron estimados en la ecuación (2), permite determinar si existe un efecto causal de DU sobre AP . La probabilidad de rechazo de ambas pruebas de hipótesis pueden determinarse mediante la prueba de Wald.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El CUADRO I y la Fig. 1 muestran estadísticas descriptivas y tendencias de las variables que han sido modeladas. En el panel inferior izquierdo, se muestra la producción de agua potable en los dos acueductos estudiados: evidentemente, la producción del acueducto metropolitano es un orden de magnitud mayor al del acueducto de la ESPH, lo cual es esperable porque es cinco veces más grande. La producción fluctúa de forma más o menos constante durante largos periodos; resulta interesante que para el acueducto de la ESPH esta producción se mantuvo constante desde el inicio de la serie (enero de 2010) hasta aproximadamente mediados de 2017 y, a partir de entonces, adquiere una tendencia creciente. En el acueducto metropolitano, la producción fluctúa alrededor de esta cantidad constante hasta inicios de 2015, crece esta producción hasta mediados

de 2017 y luego de vuelve a estabilizar (en torno a un nivel de producción más alto que al inicio de la década) hasta 2020.

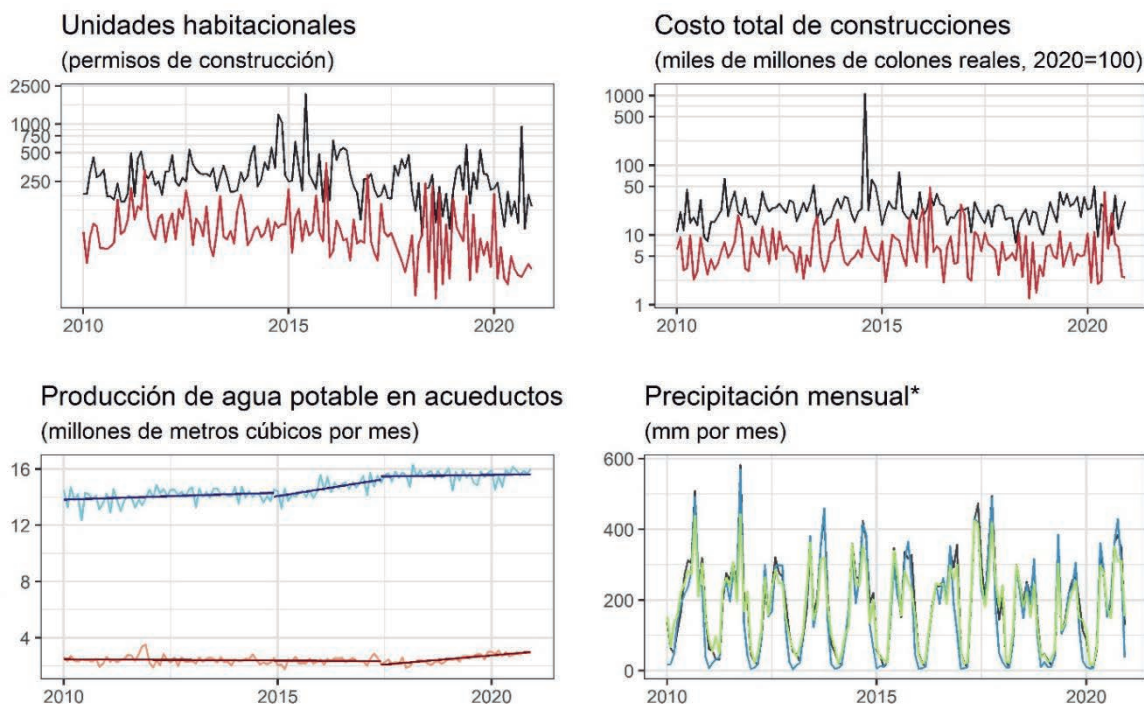


Fig. 1. Tendencias de producción de agua y desarrollo urbano en el área de cobertura de los acueductos metropolitanos y de Heredia y de precipitación en Río Macho, Puente de Mulas y San Isidro de Heredia. *En verde: precipitación de Río Macho; en azul: precipitación en Puente de Mulas; en gris: precipitación en San Isidro de Heredia.

Los cambios de tendencia en la producción de agua no se explican por variaciones en la precipitación: como puede verse en el panel inferior derecho, la precipitación en puntos cercanos a las fuentes del acueducto metropolitano (Río Macho y Puente de Mulas) y del acueducto de la ESPH (San Isidro de Heredia) varían de forma similar; estas variaciones no parecen relacionarse con la producción de agua (y en particular sobre los periodos de crecimiento). Habría que suponer que las diferencias de producción posiblemente tengan que ver con inversión en infraestructura para la extracción y procesamiento del agua antes que con variaciones en el recurso hidráulico.

De la Fig. 1 y CUADRO I también puede concluirse que las variables que representan el crecimiento urbano (viviendas construidas y costo de construcción total, paneles superiores de la Fig. 1) fluctúan más o menos aleatoriamente al mismo nivel durante todo el periodo analizado, acaso con mayor variabilidad en los meses más recientes. Los niveles de dispersión son, en general, similares a los correspondientes a precipitación: coeficientes de variación entre 60% y 85%, con la excepción de costo total de construcción en San José (282%, que se explica por un valor atípico en agosto de 2014). Es notable el contraste de estas variables con la producción de agua en ambos acueductos, cuyos niveles de dispersión son mucho menores (coeficientes de variación menores al 12%).

CUADRO I
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y PRUEBA DE Dickey-FULLER AUMENTADA
DE RAÍZ UNITARIA DE SERIES TEMPORALES ANALIZADAS

	Media	Desv. Est.	Mín.	Máx.	Prueba de Dickey-Fuller aumentada ⁺	
					Tendencia	Deriva
<i>Producción de acueducto metropolitano [$\cdot 10^6$ m³/mes]</i>	14.67	0.82	12.36	16.30	-5.782*	-2.336
<i>Producción de acueducto de ESPH [$\cdot 10^6$ m³/mes]</i>	2.44	0.29	1.78	3.51	-5.025*	-4.789*
<i>Viviendas construidas en AMSJ</i>	310	233	68	2067	-5.629*	-5.241*
<i>Viviendas construidas en AMH</i>	86	61	15	387	-6.756*	-5.221*
<i>Costo de construcción total en AMSJ [$\cdot 10^6$ €/mes]</i>	32133	90777	7817	1059235	-6.657*	-6.656*
<i>Costo de construcción total en AMH [$\cdot 10^6$ €/mes]</i>	7426	6526	1247	47856	-8.047*	-8.081*
<i>Precipitación en Río Macho [mm/mes]</i>	181.28	108.66	15.97	442.88	-7.037*	-7.004*
<i>Precipitación en Puente de Mulas [mm/mes]</i>	165.51	137.87	4.65	569.36	-7.461*	-7.488*
<i>Precipitación en San Isidro de Heredia [mm/mes]</i>	190.67	129.50	7.79	582.82	-7.217*	-7.228*

+Prueba realizada sobre logaritmo natural de los niveles de las variables *Rechaza H0 con $p < 0.01$.

En el CUADRO I también se reportan los resultados de la prueba de Dickey-Fuller aumentada, para probar la existencia de raíces unitarias. Los logaritmos naturales de todas las variables resultan ser estacionarias en sus niveles, de acuerdo con el estadístico (con la única posible excepción de producción de agua en el acueducto metropolitano, que en una de las versiones de la prueba –incluyendo deriva– no permite rechazar la hipótesis nula de raíz unitaria).

El CUADRO II resume los resultados de las pruebas de Wald sobre causalidad de Granger. Para todos los modelos, existe un efecto causal (en el sentido de Granger) del desarrollo urbano, tanto viviendas como costo total de construcción, sobre la producción de agua potable del acueducto. Cuando se examinan los coeficientes de regresión, las elasticidades de vivienda y costo sobre la producción de agua tienden a ser positivos (a mayor desarrollo urbano, mayor producción de agua potable). De igual forma, existen relaciones causales de la producción de agua sobre la cantidad de viviendas (en el área de cobertura de ambos acueductos); los coeficientes en los modelos de vectores autorregresivos correspondientes tienden a presentar poca significancia estadística. Las relaciones causales de costo total sobre producción de agua no son estadísticamente significativas.

CUADRO II
PRUEBA DE WALD PARA CAUSALIDAD DE GRANGER

Variable dependiente	Determinantes ⁺	Acueducto metropolitano		Acueducto de Heredia	
		χ^2 (g.l.)	Prob.	χ^2 (g.l.)	Prob.
		Modelo 1		Modelo 2	
<i>Ln de producción de agua</i> [$\times 10^6$ m ³ /mes]	<i>Viviendas construidas, precipitación</i> [mm/mes]	480.40* (28)	<0.001	41.09* (8)	<0.001
<i>Viviendas construidas</i>	<i>Ln de producción de agua</i> [$\times 10^6$ m ³ /mes], <i>precipitación</i> [mm/mes]	6.25* (28)	<0.001	48.65* (8)	<0.001
		Modelo 3		Modelo 4	
<i>Ln de producción de agua</i> [$\times 10^6$ m ³ /mes]	<i>Ln de costo de construcción total</i> [$\times 10^6$ ¢/mes], <i>precipitación</i> [mm/mes]	520.12* (26)	<0.001	56.29* (10)	<0.001
<i>Ln de costo de construcción total</i> [$\times 10^6$ ¢/mes]	<i>Ln de producción de agua</i> [$\times 10^6$ m ³ /mes], <i>precipitación</i> [mm/mes]	20.11 (26)	0.306	5.81 (10)	0.831

⁺Prueba de Wald no considera efecto de precipitación *Rechaza H_0 con $p < 0.01$.

Los resultados que se reportan permiten algunas conclusiones iniciales sobre las preguntas de investigación planteadas. Primero, la influencia del clima sobre tanto el desarrollo urbano como sobre la producción de agua en ambos acueductos no es estadísticamente significativa; Costa Rica presenta altos niveles de precipitación que implican la existencia de recurso hidráulico físico y el principal obstáculo a la satisfacción de la demanda por agua potable es, en consecuencia, la infraestructura y no la disponibilidad del recurso. Segundo, claramente hay un impacto del desarrollo urbano sobre la producción de agua en los acueductos pero no de la producción de agua sobre el desarrollo urbano.

Las relaciones entre desarrollo urbano y producción de agua potable no parecen recíprocas y no hay evidencia estadísticas del efecto del desabastecimiento de agua potable sobre la construcción. Esto es consistente con algunas características del sistema: los acueductos cubren áreas de relativamente antigua urbanización (más en San José que en Heredia) y la población regional está creciendo muy lentamente, de modo que, aunque hay más cantidad de viviendas, la cantidad de personas que consumen el agua no aumenta tan rápidamente. Sin embargo, es también cierto que estos resultados son agregados. El acueducto metropolitano tiene sectores asociados a distintas fuentes con diferentes niveles de afectación en términos de desabastecimiento (por ejemplo, debería esonerarse que haya mayores consecuencias sobre la renovación urbana en los sectores del acueducto metropolitano suplidos por los campos de pozos de La Valencia o Puente de Mulas y menores, en áreas suplidas por la planta potabilizadora de Tres Ríos, originada en el embalse de Río Macho).

REFERENCIAS

- [1] F. Angulo-Zamora, "Uso, manejo y gestión del agua en Costa Rica", Programa Estado de la Nación, San José, Costa Rica, Investigación de base para el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2021, 2021.

- [2] D. Canales. “En riesgo nuevos empleo y atracción de inversiones por escasez de agua, alertan Cámaras”. La República. <https://www.larepublica.net/noticia/en-riesgo-nuevos-empleo-y-atraccion-de-inversiones-por-escasez-de-agua-alertan-camaras> (accesado en mayo 5, 2025).
- [3] E.A. González-Ramírez, “Distribución geográfica de la disponibilidad e inversión en infraestructura de sistemas de agua potable y saneamiento en Costa Rica”, *Rev. Geogr. América Central*, vol. 2, no. 49, pp. 103-132, julio 2012.
- [4] A. Barrantes. “Sequía baja las fuentes de agua en la GAM a menos de la mitad”. reliefweb. <https://reliefweb.int/report/costa-rica/sequ-baja-las-fuentes-de-agua-en-la-gam-menos-de-la-mitad> (accesado en mayo 8, 2025).
- [5] J. Liu *et al.*, “Complexity of coupled human and natural systems”, *Science*, vol. 317, no. 5844, pp. 1513-1516, septiembre 2007.
- [6] M. Sivapalan *et al.*, “Socio-hydrology: A new science of people and water”, *Hydrol. Process.*, vol. 26, no. 8, pp. 1270-1276, abril 2012.
- [7] Naciones Unidas. “17 objetivos para transformar nuestro mundo”. Objetivos de Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/> (accesado en mayo 5, 2025).
- [8] F.E. Otto. “Attribution of extreme events to climate change”, *Annu. Rev. Environ. Resour.*, vol. 48, no. 1, pp.813-828, agosto 2023.
- [9] G. Cerulli, *Econometric Evaluation of Socio-Economic Programs. Theory and Applications*. Berlín y Heidelberg, Alemania: Springer, 2015.
- [10] W.R. Shadish *et al.*, *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference*. Boston y Nueva York: Houghton Mifflin, 2002.
- [11] W. Shipley, *Cause and Correlation in Biology. A User’s Guide to Path Analysis, Structural Equations and Causal Inference with R*, Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2016.
- [12] J.R. Freeman, “Granger Causality and the Times Series Analysis of Political Relationships”, *Am. J. Polit. Sc.*, vol. 27, no. 2, pp. 327–358, mayo 1983.
- [13] E.L. Glaeser y J.M. Poterba, “Introduction”, en *Economic Analysis and Infrastructure Investment*, E.L. Glaeser y J.M. Poterba, Ed. Chicago, IL, USA: University of Chicago Press, 2021, pp. 1-38.
- [14] M.O. Smolka y F. Furtado, Ed., *Instrumentos notables de políticas de suelo en América Latina*. Quito: Ministério das Cidades de Brasil, Lincoln Institute of Land Policy y Banco del Estado de Ecuador.
- [15] Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos. “Producción neta de agua”. aresep.go.cr. <https://aresep.go.cr/datos-abiertos/produccion-neta-agua/> (accesado en mayo 4, 2025).
- [16] Instituto Nacional de Estadística y Censos. “Estadísticas de la Construcción”. Programa Acelerado de Datos INEC / Costa Rica. <https://sistemas.inec.cr/pad5/index.php/catalog/RegContruc> (accesado en mayo 4, 2025).
- [17] C. Funk *et al.*, “The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes”, *Sci. Data*, vol. 2, pp. 150066, diciembre 2015.

Diseño de los espacios urbanos desde una perspectiva gerontológica e inclusiva para Costa Rica

Designing urban spaces: A gerontological and inclusive perspective for Costa Rica

Sofía Fonseca Céspedes

Estudiante de la carrera de arquitectura, UCR

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

Jimmy Rodríguez Alfaro

Estudiante de la carrera de arquitectura, UCR

e-mail: jimmy.rodriguezalfaro@ucr.ac.cr

Paola Vargas Quintana

Estudiante de la carrera de arquitectura, UCR

e-mail: paola.vargasquintana@ucr.ac.cr

Luis Armando Durán Segura

Docente e investigador de la Escuela de arquitectura, UCR

e-mail: luisarmando.duran@ucr.ac.cr

Helga von-Breymann

Docente e investigadora Escuela de arquitectura, UCR

e-mail: helga.vonbreymann@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Diseño gerontológico, diseño urbano, envejecimiento y ciudad, persona adulta mayor, planeamiento urbano.

Keywords:

Gerontological design, urban design, aging and the city, older adult, urban planning.

RESUMEN

El envejecimiento demográfico representa un reto crucial para el planeamiento urbano, exigiendo la adaptación de los entornos urbanos a las necesidades de la población adulta mayor. Este estudio tuvo como objetivo identificar las principales dificultades que enfrenta este grupo poblacional en su experiencia cotidiana en los entornos urbanos costarricenses para así trazar pautas de diseño desde una visión gerontológica. Para ello se realizó una revisión documental, fichas de observación a partir de tres casos de estudio y 18 entrevistas caminantes con población adulta mayor. Los hallazgos revelaron las principales deficiencias de los espacios urbanos actuales y permitieron formular nueve pautas de diseño específicas. Estas directrices buscan mejorar la experiencia cotidiana de los adultos mayores en el país. A pesar de los avances significativos en el tema, el

diseño de espacios urbanos amigables con los mayores aún requiere estrategias concretas y personalizadas, que superen enfoques genéricos y aborden las particularidades de este grupo poblacional.

ABSTRACT

Demographic aging presents a crucial challenge for urban planning, necessitating the adaptation of urban environments to the needs of the older adult population. This study aimed to identify the main difficulties faced by this demographic group in their daily experiences within Costa Rican urban settings, thereby establishing design guidelines from a gerontological perspective. To achieve this, a documentary review was conducted, along with observation sheets derived from three case studies, and 18 walking interviews with older adults. The findings revealed the primary deficiencies of current urban spaces and allowed for the formulation of nine specific design guidelines. These directives seek to improve the daily experience of older adults in the country. Despite significant advancements in the field, the design of age-friendly urban spaces still requires concrete and personalized strategies that move beyond generic approaches and address the particularities of this population group.

I. INTRODUCCIÓN

La población adulta mayor en Costa Rica ha experimentado un crecimiento notable en las últimas décadas. Se proyecta que para el año 2050, el 20.7% de los habitantes del país serán personas adultas mayores (PAM), según proyecciones del Centro Centroamericano de Población [1]. Este cambio demográfico plantea un conjunto significativo de desafíos sociales, económicos y de infraestructura que demandan atención urgente. Entre estos, la adaptación de las ciudades y los espacios urbanos a las necesidades y capacidades de este grupo poblacional emerge como una de las tareas más complejas. Es, por tanto, fundamental desarrollar una estrategia política integral que facilite estas transformaciones, buscando no solo mejorar la calidad de vida de la población envejecida, sino también promover su plena integración en las dinámicas urbanas de las que a menudo se encuentran excluidos.

A nivel global, diversas directrices, recomendaciones, programas y políticas se han formulado con el propósito de fomentar una vida plena en la vejez, optimizar las condiciones de salud y bienestar, y crear entornos propicios para un envejecimiento activo. Estas iniciativas también persiguen la prevención de la discriminación y la violencia, el desarrollo de capacidades y la promoción de un cambio cultural inclusivo [2], [3].

Costa Rica se alinea con esta tendencia global, habiendo desarrollado una serie de programas, políticas y estrategias dirigidas a mejorar las condiciones específicas que requiere este grupo poblacional. Destacan la Estrategia Nacional para el Envejecimiento Saludable del Ministerio de Salud [4], la Política Nacional de Envejecimiento y Vejez 2023-2033 [5] y su participación en la guía “Ciudades Globales Amigables con los Mayores” de la Organización Mundial de la Salud. Además, instituciones diversas han impulsado iniciativas como el Programa Institucional para la Persona Adulta y Adulta Mayor (PIAM) de la Universidad de Costa Rica, el Programa de Atención Integral de la Persona Adulta Mayor (PAIPAM) de la Universidad Nacional, y el programa “Ciudadano de

Oro” de la Caja Costarricense de Seguro Social. Estas, entre otras acciones, comparten el objetivo de mejorar la calidad de vida de las PAM en el país.

A pesar de estas importantes iniciativas, las respuestas a las necesidades de la población envejecida en relación con el uso del espacio urbano son pocas y tienden a centrarse primordialmente en el diseño del espacio público. Esta perspectiva, a menudo pasa por alto necesidades fundamentales relacionadas con la autonomía, la independencia, las relaciones sociales, la salud y la seguridad. Estas dimensiones representan oportunidades cruciales en el entorno construido para el desarrollo de la resiliencia y el fortalecimiento de las comunidades, contribuyendo así a una vida plena y productiva para las personas adultas mayores [6]. Es en esta área de trabajo, donde la arquitectura y el urbanismo tienen una responsabilidad crucial y a la vez una oportunidad enorme para un enfoque más holístico.

Entre las limitaciones que se han identificado en diversos estudios encontramos aspectos como las dificultades para desplazarse por el territorio, la inadecuación de espacios de descanso o esparcimiento apropiados, o las dificultades de acceso a vivienda digna [7], [5], aspectos que vulnerabilizan las oportunidades para la experiencia de una vida plena y la construcción de lazos sociales para las PAM.

Es imperativo que la planificación urbana y el diseño urbano respondan a los estereotipos y percepciones negativas que se asocian a este grupo poblacional, y que la concepción de la ciudad integre activamente sus necesidades y particularidades. El diseño de los espacios urbanos debe fomentar la participación activa y autónoma de las PAM, lo que requiere una transformación fundamental en la comprensión del envejecimiento dentro del ámbito del diseño y la planificación urbana [8]. El diseño con perspectiva gerontológica, llamada también gerontodiseño [9], busca mejorar los procesos y productos de diseño para incidir positivamente en la calidad de vida de las personas mayores. Para ello contempla no sólo los aspectos funcionales (ergonomía, antropometría, etc.), sino también los emocionales, favoreciendo los elementos sociales y culturales de las PAM [10].

Este texto presenta los resultados de un proyecto de investigación que tuvo como objetivo identificar las dificultades que enfrentan las PAM en los espacios urbanos costarricenses para definir pautas de diseño gerontológico que favorezcan la adaptación de estos espacios ante el inminente crecimiento de la población adulta mayor en el país.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adoptó un enfoque principalmente cualitativo, de naturaleza exploratoria y documental, estructurado en varias etapas. Inicialmente, se llevó a cabo un exhaustivo análisis documental y una revisión de antecedentes. Seguidamente, se desarrolló un análisis de casos de estudio que facilitó la recopilación de datos en tres distritos distintos: San Vicente de Moravia, Quebradilla de Cartago y Tres Ríos de La Unión de Cartago, todos pertenecientes a la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. La selección de estos distritos respondió a la búsqueda de representatividad en diversas condiciones, tales como el grado de envejecimiento poblacional, la dicotomía

urbano-rural, y las diferencias administrativas y de gestión derivadas de su pertenencia a distintos municipios.

En los tres distritos seleccionados, se realizaron análisis de contexto para evaluar sus condiciones socioeconómicas y físico-espaciales. Esta fase culminó en la elaboración de un diagnóstico que permitió identificar las condiciones actuales de los contextos urbanos estudiados y el nivel de integración de principios de diseño urbano adaptados a las necesidades de la población adulta mayor.

Posteriormente, se llevaron a cabo entrevistas caminantes con adultos mayores residentes de cada distrito, sumando un total de seis entrevistas por contexto. Esta metodología permitió explorar la experiencia cotidiana de este grupo poblacional en su entorno urbano. Tras la transcripción y el análisis de los datos recabados en estas entrevistas, se procedió a la fase final del estudio, centrada en la propuesta de pautas de diseño orientadas a integrar estrategias que mejoren la experiencia de la población envejecida en los contextos urbanos analizados.

A. Participantes e Instrumentos

Los participantes del estudio fueron 18 adultos, todos mayores de 60 años y residentes de los tres contextos estudiados, con una distribución equitativa de hombres y mujeres. Variables sociodemográficas como raza, estrato socioeconómico u orientación sexual no fueron consideradas como criterios de inclusión o exclusión.

En cuanto a los instrumentos de recolección de datos, se emplearon principalmente dos. El primero consistió en fichas de observación diseñadas para la recopilación de datos sobre las características físico-espaciales de los lugares analizados. Estas fichas registraron información sobre las condiciones de la infraestructura urbana, aspectos morfológicos, conectividad y dinámicas de uso del espacio público. El segundo instrumento fue un cuestionario abierto y flexible, aplicado durante las entrevistas caminantes. Este cuestionario abordó el uso del espacio urbano, los desafíos y dificultades enfrentados por los participantes, así como sus expectativas de cambio y necesidades identificadas. Las entrevistas fueron grabadas, con el consentimiento respectivo, para su posterior análisis, y se complementaron con notas de campo y fotografías tomadas por los investigadores.

B. Estrategias de Análisis

Las estrategias de análisis incluyeron la revisión y sistematización de los datos obtenidos de las fichas de observación para la caracterización de cada contexto. Adicionalmente, se transcribieron las 18 entrevistas caminantes y se realizó un análisis de contenido de la información recabada. Los resultados obtenidos a partir de este análisis sirvieron como base para la formulación de conclusiones parciales que, a su vez, permitieron la elaboración de las pautas de diseño propuestas, pensadas para su implementación en los ámbitos estudiados.

III. RESULTADOS

Tras el análisis realizado a partir de la observación participante y las entrevistas caminantes

se identificaron algunos aspectos claves que están influyendo en las condiciones de los espacios urbanos y la experiencia de la población adulta mayor en estos contextos.

En primer lugar, la infraestructura urbana en los tres distritos estudiados presenta limitaciones significativas para las PAM. En San Vicente, aunque las aceras céntricas están en mejor estado, persisten obstáculos como vegetación invasiva, calzadas deterioradas y una inadecuada transición entre calle y acera. A esto se suman caños amplios, la escasez de pasos peatonales y paradas de autobús, lo que desalienta la caminabilidad y fomenta el uso del automóvil. En Tres Ríos, las aceras siguen representando un riesgo, si bien ha habido mejoras en los parques gracias a la reforestación. Finalmente, en Quebradilla, el deterioro es más crítico: hay zonas sin aceras, el mobiliario urbano está en mal estado y la calidad del espacio público es deficiente.

La categoría de accesibilidad y autonomía reveló que, aunque los participantes cuentan con la capacidad física para desplazarse de forma segura e independiente, el estado actual de la infraestructura vial y peatonal es una de las principales barreras, limitando la accesibilidad en los tres distritos. Los participantes destacaron nuevamente el deterioro de las aceras como un factor que restringe la movilización peatonal. Esto les lleva a optar por rutas más largas o el uso de vehículos, motivado por el temor a caídas o a no poder acceder de forma segura a ciertos lugares.

En los tres distritos, los participantes perciben el espacio público como accesible para las PAM, y la edad no condiciona su autonomía e independencia, siempre que no exista una condición de movilidad limitada. Sin embargo, en la categoría “Uso y dinámicas del espacio público”, se evidenció una baja utilización de parques y áreas verdes. El uso del espacio público se reporta principalmente como zona de paso para actividades cotidianas o para la práctica deportiva, sobre todo en referencia a las aceras. La necesidad de espacios inclusivos, accesibles y con servicios básicos es una constante en los tres contextos estudiados.

En lo relativo a la percepción de seguridad, se logró identificar que la población adulta mayor asocia la presencia de amistades dentro del barrio y la instalación cámaras y portones, como elementos que favorecen la percepción de seguridad. También reportan haber adaptado sus actividades a horarios diurnos para evitar exponerse a peligros ante la inseguridad percibida, que aumenta durante la noche. Además, cuanto más urbano es el sitio, mayor es la inseguridad percibida por esta población. En San Vicente, los adultos mayores temen llevar objetos de valor si caminan, y suelen ir acompañados por una persona o mascota. En contraste, Quebradilla presenta una percepción de seguridad media o alta durante el día. El temor al delito percibido por este grupo etario se refleja en la poca visitación y participación en actividades en parques y zonas comunales. No obstante, en Tres Ríos, las personas adultas mayores sí utilizan los espacios comunales, gracias a la activación de actividades recreativas o deportivas en las que pueden participar, aunque algunas estén más enfocadas en la población joven, lo que genera cierta exclusión. Aún así, los espacios públicos de este distrito se han convertido en una zona de convergencia para actividades sociales y recreativas. Esto subraya la importancia de la provisión de actividades inclusivas para las PAM, que fomenten el uso del espacio público y la necesidad de un buen diseño de estos espacios en los distintos distritos del país.

Finalmente, respecto a la apropiación de los espacios urbanos, tanto en Quebradilla como en San Vicente, se evidenció una mayor apropiación de lugar en espacios residenciales de carácter más privado y con menor densidad de personas, pudiendo ser condominios o residenciales. Esto se debe a una percepción general de que estos espacios son más seguros y tranquilos, mientras que el centro de los distritos se percibe como inseguro, menos transitable y con una oferta limitada de actividades y espacios dedicados al disfrute personal y colectivo. Por el contrario, en Tres Ríos, la apropiación del espacio público está vinculada con el disfrute de actividades recreativas, sociales y deportivas, generando un vínculo intrínseco entre el sentido de apropiación y el aprovechamiento del espacio. Ambas situaciones reflejan la importancia de las oportunidades de disfrute para generar el sentido de apropiación.

A. Pautas de diseño del espacio urbano para las PAM

Los resultados del análisis de datos posibilitaron la definición de pautas de diseño, las cuales deben entenderse como propuestas o recomendaciones que pueden implementarse en los ámbitos estudiados con el propósito de mejorar la adaptabilidad de los espacios urbanos a las necesidades y limitación de los usuarios de mayor edad. Las pautas propuestas se organizan en nueve líneas, las cuales se describen y resumen a continuación.

Pauta de diseño 1: Circulación peatonal accesible para PAM. Esta pauta busca aumentar y optimizar la accesibilidad en las aceras para las PAM por medio de un diseño universal. Resalta la importancia del uso de cerámicas táctiles, rampas, el aumento del ancho de la acera y la implementación de señalización adecuada. Con ello se busca fomentar la caminabilidad y conectividad de las ciudades para las personas adultas mayores, lo que conlleva a una mayor activación de espacios públicos, comerciales y de servicios por parte de esta población. Además, mejoraría la calidad de vida y la salud de las PAM y de la percepción de las ciudades ante la comunidad.

Pauta de diseño 2: Seguridad vial del peatón. Esta pauta abarca estrategias como la ampliación de esquinas de cruce peatonal, diseño de cruces peatonales seguros, el uso de calles compartidas y la adecuada colocación de canales de drenaje de aguas pluviales, con la finalidad de otorgarle al peatón un mayor protagonismo en el uso de la ciudad, minimizar el riesgo por tráfico vehicular, y así transformar la infraestructura vial para que sea más segura y accesible. Estas intervenciones lograrían impulsar la autonomía y la movilidad independiente de la persona adulta mayor, impulsando su presencia activa en el espacio público.

Pauta de diseño 3: Transporte público e infraestructura para PAM. Esta pauta tiene como objetivo la mejora de la infraestructura de paradas de transporte público con el fin de aumentar la accesibilidad e inclusión del servicio y facilitar la movilización de las personas adultas mayores por las ciudades. Se debe considerar la ubicación estratégica, el diseño universal y la seguridad en las paradas de transporte público para autobús, taxi y tren. Este tipo de intervención aumenta el nivel de accesibilidad del servicio de transporte, pero además fomenta la caminabilidad y sostenibilidad en las ciudades.

Pauta de diseño 4: Adaptación del espacio público existente para PAM. Esta pauta reúne diversas estrategias enfocadas en la adaptación del espacio público según las condiciones y características

de la población adulta mayor, esto con la intención de mejorar los elementos físicos en deterioro o que limitan tanto la accesibilidad como la inclusión. Se desarrollan estrategias que incluyen la mejora de las condiciones en el mobiliario urbano, accesos, circulaciones, espacios de socialización, cobertura vegetal, seguridad física, entre otras. La adaptación de estos espacios ayudaría a mejorar la calidad de vida de esta población en áreas urbanas, así como facilitar la movilidad autónoma, reducir el aislamiento, fomentar la integración social y promover la participación comunitaria activa.

Pauta de diseño 5: Circuito peatonal para PAM. Esta pauta tiene como objetivo la creación de una red de circulación peatonal accesible y amigable con la PAM. Este circuito se compone de un sendero o acera principal emplazada dentro del tejido urbano que conecta distintos espacios y servicios clave para esta población en un mismo recorrido, así se puede garantizar un desplazamiento seguro, cómodo y accesible dentro de un entorno urbano. Se toman en consideración aspectos como materialidad, señalización, seguridad física, protección al clima, confort, socialización, descanso, entre otras. La aplicación de esta pauta ayudaría a mejorar la movilidad diaria, fomentar la actividad física, facilitar el acceso a servicios esenciales, promover la autonomía y participar activamente en la vida comunitaria.

Pauta de diseño 6: Red de baños públicos y accesibles para PAM. Esta pauta consiste en la creación de una red de baños públicos gratuitos en algunos espacios públicos para posibilitar el disfrute de estos espacios por parte de las PAM. Este grupo de población tiene una mayor necesidad de tener acceso a servicios sanitarios por las condiciones médicas o el envejecimiento natural de estas personas. La inclusión de una red de servicios sanitarios con diseño universal y accesible aumentaría la autonomía, calidad de vida y duración de las estancias de la población adulta mayor en los espacios públicos.

Pauta de diseño 7: Seguridad física y percibida en espacios públicos para PAM. Esta pauta abarca estrategias como la eliminación de bloqueos visuales, la iluminación en capas, la incorporación de botones de emergencia y la creación de estaciones de vigilancia, lo que transforma los espacios públicos en entornos más seguros, accesibles y acogedores. Esto lograría fomentar la autonomía y la movilidad de las personas adultas mayores, incentivando su participación en la vida comunitaria. Además, al sentirse seguras y consideradas en el diseño urbano, se reduce el aislamiento social, se promueve la salud física y emocional, y se fortalecen los vínculos sociales.

Pauta de diseño 8: Presencia de vegetación en los espacios públicos. Esta pauta busca la adecuada implementación y diseño de la vegetación en los espacios públicos para cambiar la percepción del espacio y cómo se vive dentro de él, ya que beneficia la calidad medioambiental, el confort y la experiencia de la población en el entorno físico, así como las atribuciones estéticas y paisajísticas del lugar. Tomando en cuenta lo anterior, desde el punto de vista social, los espacios con vegetación podrían ofrecer condiciones más cómodas y seguras para la permanencia y tránsito, lo que fomentaría el uso constante del entorno.

Pauta de diseño 9: Señalética universal. Esta pauta busca el desarrollo y aplicación de señalética universal y accesible desde la arquitectura inclusiva, la cual se caracteriza por integrar mensajes informativos y de orientación fáciles de interpretar y adaptables a las diversas capacidades

de las personas, en especial de las PAM. Reúne estrategias para el diseño y colocación de varios tipos de señalización y en varias escalas de aplicación, de manera que las personas sean capaces de comprender y hacer uso de la información que se transmite en las señales y carteles, brindando la autonomía requerida para orientarse y desplazarse, sin que esto represente un obstáculo. Esto permite eliminar barreras de comunicación y accesibilidad, aumentar la independencia y asegurar el acceso a la información al transitar por el espacio público.

IV. DISCUSIÓN

A pesar de que Costa Rica cuenta con instrumentos y normativas para mejorar las condiciones urbanas de la población envejecida, la revisión de antecedentes revela que estos tienen un alcance limitado y no se centran en las necesidades específicas de las personas adultas mayores. La mayoría de las iniciativas se enfocan en servicios sociales, salud o vivienda, dejando de lado las estrategias para el entorno urbano y la movilidad. Si bien algunos documentos abordan la accesibilidad, lo hacen de forma general para personas con discapacidad, sin considerar las particularidades de las PAM. Esta falta de especificidad resalta la urgencia de un enfoque más detallado e inclusivo que contribuya al desarrollo de una vida plena y productiva para esta población [6].

El trabajo de campo, y especialmente las entrevistas caminantes, permitieron conocer con detalle las dificultades a las cuales se enfrentan diariamente este grupo de población al encontrarse en los espacios urbanos, así como las limitadas oportunidades para disfrutar de estos espacios de encuentro social. Al igual que en estudios previos, resaltaron las dificultades para desplazarse a pie, para el uso de los servicios de transporte público y la adecuación de espacios públicos para el descanso y la socialización [5] [7].

Asimismo, se observó una mayor adaptabilidad en espacios urbanos centralizados frente a las zonas rurales, donde las intervenciones son más restringidas. Esta situación, no exclusiva de Costa Rica, podría reflejar una cultura social que invisibiliza las necesidades de las PAM, perpetuando su discriminación.

CONCLUSIONES

Este trabajo destaca una creciente concientización sobre las necesidades de las personas adultas mayores en el espacio urbano. Si bien iniciativas globales y programas nacionales han contribuido a esto, aún es crucial reforzar las estrategias y lineamientos en la planificación urbana para lograr un mayor impacto. Costa Rica se enfrenta a un reto muy grande por el gran porcentaje de población que será adulta mayor en las próximas décadas, por lo que se hace necesario tomar acciones concretas para la mejorar del espacio urbano que le permita a este grupo de población mantener su independencia, autonomía e integración plena en sus comunidades, mejorando así su calidad de vida. El diseño gerontológico [9] no solo aborda las necesidades funcionales, sino que también considera aspectos psicosociales para ofrecer respuestas más adecuadas a esta población [10]. Por lo tanto, es esencial buscar estrategias para incorporar esta línea de diseño en los procesos de toma de decisiones que moldean nuestras ciudades.

Al igual que con otros grupos poblacionales, la estigmatización y discriminación merman las oportunidades de las personas adultas mayores. En este sentido, es imperativo que el planeamiento urbano asuma la responsabilidad de romper estas dinámicas de exclusión, fundamentales para el bienestar social.

La mejora de los espacios para las PAM contribuye a crear ciudades más atractivas, lo que a su vez dinamiza las actividades dentro del cantón [11]. Intervenciones como la optimización de los espacios públicos, las aceras y la infraestructura de transporte público, junto con un aumento de la seguridad, incrementan la caminabilidad en diversos contextos. Esto, a su vez, fomenta la sostenibilidad urbana y garantiza un mayor derecho a la ciudad para todas las poblaciones.

REFERENCIAS

- [1] Centro Centroamericano de Población, Programa Integral para la Persona Adulta Mayor y Comisión Nacional de la Persona Mayor, *II Informe Estado de Situación de la Persona Adulta Mayor en Costa Rica*. 2020. Accesado: [octubre 21, 2024]. [En línea]. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/81562/DOCUMENTO%2011%20de%20agosto%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [2] Fondo de Población de las Naciones Unidas, *Ageing in the Twenty-First Century: A Celebration and A Challenge*. Nueva York: United Nations Population Fund, 2012 [En línea]. Disponible en: <https://www.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/Ageing%20report.pdf>
- [3] Comisión Económica para América Latina y el Caribe, *Ageing in Latin America and the Caribbean: Report of Latin America and the Caribbean for the fourth review and appraisal of the Madrid International Plan of Action on Ageing*. Santiago: CEPAL, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/703b8179-ba9d-4838-8ec1-61405dbcbcd18/content>
- [4] Ministerio de Salud de Costa Rica, *Estrategia Nacional para el Envejecimiento Saludable*, San José: Ministerio de Salud, 2022.
- [5] Consejo Nacional de la Persona Adulta Mayor, *Política Nacional de Envejecimiento y Vejez 2023-2033*. San José: CONAPAM, 2023. [En línea]. Disponible en: https://costarica.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/politica_nacional_envejecimiento_y_vejez_web_0.pdf
- [6] S. Moore y G. Clark, “Age-Friendly City Design: Identifying Common Opportunities across the World,” *Architecture AU*. <https://architectureau.com/articles/age-friendly-city-design/> (accesado enero 15, 2025).
- [7] C. Garrocho and I. Vilchis, “Las Age-Friendly Cities facilitan la movilidad de los adultos mayores,” *KORPUS 21*, vol. I, no. 2, pp. 295-316, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://korp21.cmq.edu.mx/index.php/ohtli/article/view/35>
- [8] L. A. Vega, “Ciudad, envejecimiento-vejez y educación: Elementos para develar un conflicto entre la ciudad concebida y la ciudad practicada,” *Sophia*, vol. 10, no. 1, pp. 50-63, 2014.
- [9] J. Parra Marujo, “Gerontodesign: a marca de água do design, do design ergonómico, da marca ou das marcas brancas,” *Artician Magazine*, 2006.
- [10] A. Maya Rivero y M. Á. Rubio Toledo, “Gerontodiseño. Nueve estrategias de diseño sostenible para adultos mayores,” *Interiorgrafico, Guanajuato*, 2017. <https://www.interiorgrafico.com/edicion/decimo-septima-edicion-diciembre-2017/gerontodiseno-nueve-estrategias-de-diseno-sostenible-para-adultos-mayores>.
- [11] Global Designing Cities Initiative y National Association of City Transportation Officials, *Global Street Design Guide*. Nueva York: Island Press, 2016.

Movilidad segura y eficiente / Impacto del transporte

Análisis de Patrones de Movilidad Peatonal mediante Procesos Participativos

Analysis of Pedestrian Mobility Patterns through Participatory Processes

Ing. Lorenzo Gerardo Barrantes Vargas
Egresado, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: lorenzo.barrantes@ucr.ac.cr

Ing. Mariana Sánchez Aguilar
Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: mariana.sanchezaguiar@ucr.ac.cr

Ing. Lucía Denise Sancho Arce
Egresada, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: lucía.sanchoarce@ucr.ac.cr

Dra. Karla Barrantes Chaves
Docente e investigadora, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR
e-mail: karla.barrantes@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Grupos focales, movilidad peatonal, procesos participativos, renovación urbana, topografía.

Keywords:

Focus groups, participatory processes, pedestrian mobility, topography, urban renewal.

RESUMEN

La participación comunal es fundamental en la planificación de las ciudades, este trabajo expone las estrategias de participación que se emplearon para diseñar un circuito urbano accesible para el distrito 01 del cantón de San Rafael de Heredia. Para lo cual se realizaron grupos focales y mapeo participativo con diferentes grupos de la comunidad. Como resultado se obtienen las percepciones en relación con la gestión municipal, infraestructura, percepción de seguridad y sentimientos asociados a los recorridos, los cuales se complementan con un análisis FODA georreferenciado que permite priorizar las zonas de intervención para el futuro diseño geométrico del circuito.

ABSTRACT

Community participation is essential in urban planning. This study presents the participatory strategies used to design an accessible urban circuit for District 01 of the San Rafael canton in Heredia. Focus groups

and participatory mapping with community groups were employed for this purpose. As a result, the study gathered perceptions related to municipal management, infrastructure, safety, and emotional responses linked to different routes. These findings are complemented by a georeferenced SWOT analysis, which helps prioritize intervention areas for the future geometric design of the circuit.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de renovación urbana que incorporan los patrones de movilidad de las personas usuarias mediante procesos participativos permiten que la obra final se adecue a las necesidades reales y corresponda efectivamente a los recorridos diarios de estas personas. La participación comunitaria en procesos de renovación urbana ha sido implementada a nivel internacional de forma exitosa en proyectos de co-diseño [1], integración intergeneracional [2], aprendizaje socio-espacial [3], corredores de transporte [4], diseño universal [5], entre otros. En este sentido, las políticas públicas y en especial las vinculadas con la inversión en infraestructura, deberían nutrirse de sistemas participativos desde la comunidad hacia las autoridades en combinación con los equipos técnicos de planificación territorial [6].

En este sentido, el presente trabajo busca exponer la estrategia de participación con la comunidad de San Rafael de Heredia, en el diseño geométrico de un circuito urbano accesible, para el distrito 01, que corresponde a la investigación base de este artículo [7]. Mediante la implementación de grupos focales y mapeo participativo fue posible conocer los patrones de desplazamiento de distintos grupos etarios, así como las razones para evitar o preferir ciertas rutas. Este insumo permitió un proceso colaborativo de diseño [2] que va más allá de los mecanismos tradicionales de consulta que buscan una validación más que un proceso de construcción colectiva y contribuir a llenar un vacío de conocimiento en cuanto a cómo disciplinas como la ingeniería topográfica pueden nutrirse de la participación comunal para generar productos que se ajusten a las necesidades de las personas usuarias de las redes peatonales.

II. METODOLOGÍA

El diseño metodológico de este trabajo busca procesar e integrar datos cualitativos en las etapas de análisis y toma de decisiones en los proyectos de ingeniería. La metodología propuesta consiste en el desarrollo de procesos participativos mediante grupos focales dirigidos a la población beneficiaria. Para lo anterior, se contactó a líderes comunales de organizaciones, instituciones y comités para facilitar la logística de presentación, coordinación y ejecución de las actividades. Datos como la fecha, lugar, tiempo, número total y rango etario de los participantes, son fundamentales para su planificación.

A través de estas reuniones, se obtienen datos empíricos sobre los patrones de desplazamiento, los lugares más concurridos y la percepción sobre la accesibilidad y movilidad con el que cuenta el sistema de aceras de la zona de estudio, por medio de la interacción de los participantes con mapas y discusiones guiadas. Según los objetivos de investigación se seleccionan los tipos de participantes, ya sea personas mayores de edad, adultos mayores, personas con discapacidades, entre otros.

Al emplear procesos participativos como método de recolección de datos, se trabaja con seres humanos e información personal, por lo tanto es necesario el cumplimiento de los protocolos de interacción con los participantes. En este caso, este proyecto cuenta con el visto bueno del Comité Ético-Científico (CEC) de la Universidad de Costa Rica. Esta entidad solicita información sobre el proyecto para asegurar que se cumplan los lineamientos de la Ley N° 9234, contemplando lo siguiente: 1) tipo y cantidad de participantes, 2) método de reclutamiento, 3) forma de recolección de datos, 4) riesgos y beneficios para los participantes, 5) grado de confidencialidad y 6) manejo de consentimientos y asentimientos informados.

El diseño de los talleres se basa en la investigación primaria de este trabajo [7], donde se planificó para cada taller reunir al menos entre 5 a 10 personas en un periodo de tiempo aproximado de una hora. Específicamente, se desarrollaron cinco etapas: 1) introducción, lectura y firma del consentimiento informado; 2) conversatorio sobre puntos de atracción; 3) diálogo guiado, FODA sobre accesibilidad y movilidad; 4) discusión y reflexión final; y 5) cierre y agradecimiento.

La primera fase consiste en una breve presentación hacia los participantes sobre el proyecto, seguida de la entrega, lectura y firma del consentimiento informado. Luego, se inicia la grabación del taller y se prosigue con un conversatorio para la identificación de los lugares y rutas que más frecuentan las personas en la zona de estudio, tomando en cuenta factores como la accesibilidad y el estado de las aceras. Para ello, de forma individual, se colorea y anota en un mapa personal cuáles son esos sitios y recorridos con mayor o menor tránsito utilizando diferentes colores.

La tercera fase trata de un diálogo guiado con los participantes de forma grupal, junto con la interacción de un mapa, igual al personal, pero de mayor tamaño, para ubicar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA) en la accesibilidad y movilidad del sistema de aceras. Dicha dinámica involucró llevar una guía de preguntas o casos sobre el estado de las aceras, percepción de seguridad, accesibilidad para personas con discapacidad y obstáculos en la zona; para dirigir las respuestas de las personas. Cada opinión se señala en el mapa con *stickers* de diferentes colores, permitiendo diferenciar el tipo de observación según el análisis FODA. Después, se realiza una discusión y reflexión final para conectar lo visualizado en el mapa grupal con los lugares y rutas más frecuentados, buscando captar la percepción general del sistema de aceras. Finalmente, se agradece la participación de las personas asistentes y se concluye la grabación del taller.

Para el procesamiento de la información recaudada en los grupos focales se utilizó la metodología sobre el análisis temático [8], el cual se compone de los siguientes pasos: 1) transcripción de los datos, 2) codificación según temática, 3) análisis de datos y 4) reporte de resultados. Por lo tanto, primeramente se transcribieron las grabaciones generadas de cada grupo focal. Seguidamente, se realizó una lectura general de dicha transcripción para determinar de manera inductiva las posibles categorías de los temas más relevantes, en este caso se determinaron cuatro categorías principales sobre los comentarios recibidos respecto al sistema de aceras del distrito: gestión administrativa, infraestructura, percepción de seguridad y sentir de la comunidad. Adicionalmente, se

generaron sub-categorías para clasificar cada comentario según el género, grupo etario, posibilidad de georreferenciación y si era positivo o negativo.

Luego, a cada tema y sub-categoría se le asignó un código para ser identificado. A continuación, se muestra un extracto como ejemplo de dicha codificación en la Fig. 1:

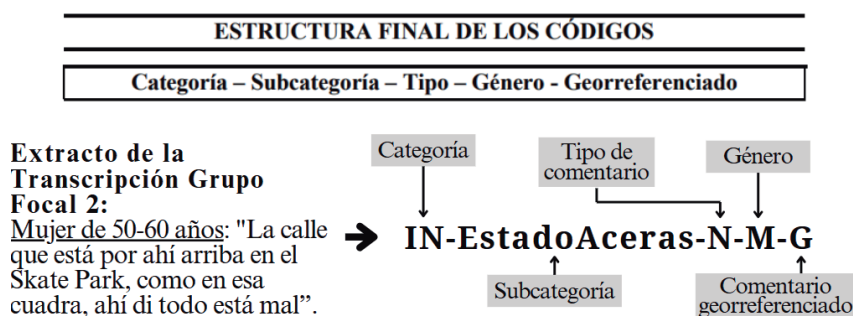


Fig. 1. Estructura para la codificación.

Nota: Imagen adaptada de [7], [9]

En la figura anterior se puede observar el extracto de la transcripción de un grupo focal en donde una mujer indica que “La calle que está por ahí arriba en el Skate Park, como en esa cuadra, ahí di todo está mal”. Según la codificación planteada, este comentario quedaría codificado dentro de la categoría de *Infraestructura* (IN), subcategoría *Estado de las Aceras* (EstadoAceras), tipo de comentario *Negativo* (N), género *Mujer* (M) y comentario debidamente georreferenciado (G). Este tipo de clasificación se determinó para todos los extractos de las transcripciones de cada grupo focal.

A partir de esta codificación y por medio de gráficos y tablas se pudo cuantificar los temas de mayor relevancia durante los talleres, la variación en la cantidad de comentarios según cada tema y las diferencias en la opinión según grupos etarios y género.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la codificación generada y la información recopilada por medio de mapas en los talleres, se obtiene información relevante para el análisis dentro de un proyecto de renovación urbana, ya que se logra cuantificar los tipos de comentarios recibidos según las clasificaciones asignadas y reflejarlos en gráficos, tablas y mapas. Seguidamente se muestran en el Cuadro I los resultados a manera de ejemplo, producto de la aplicación de la metodología antes expuesta en el distrito 01 de San Rafael [7].

CUADRO I
TOTAL DE COMENTARIOS POSITIVOS Y NEGATIVOS POR CATEGORÍA
SEGÚN GÉNERO Y GRUPO ETARIO

Categoría	Comentarios Negativos			Comentario positivos			Total general
	Hombre	Mujer	Subtotal	Hombre	Mujer	Subtotal	
Gestión administrativa	6	18	24	-	-	-	24
20-50 años	2	4	6	-	-	-	6
50-60 años	4	1	5	-	-	-	5
60-75 años	-	13	13	-	-	-	13
Infraestructura	33	119	152	23	82	105	257
20-50 años	11	11	22	2	-	2	24
50-60 años	18	27	45	12	17	29	74
60-75 años	4	81	85	9	65	74	159
Percepción de seguridad	20	37	57	2	6	8	65
20-50 años	4	4	8	-	-	-	8
50-60 años	16	15	31	1	-	1	32
60-75 años	-	18	18	1	6	7	25
Sentir	6	8	14	10	19	29	43
20-50 años	4	3	7	8	9	17	24
50-60 años	2	3	5	2	4	6	11
60-75 años	-	2	2	-	6	6	8
Total general	65	182	247	35	107	142	389

Nota: Adaptado de [7].

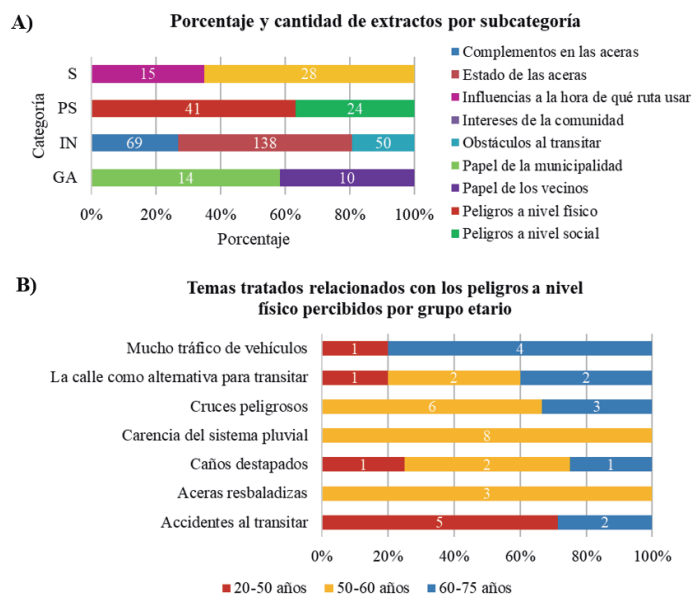


Fig. 2. Porcentajes y cantidades sobre comentarios resultantes de los talleres con grupos focales. Nota: Adaptado de [7].

También, se pudo extraer por medio de gráficos los porcentajes y cantidades de comentarios recibidos según las subcategorías generadas. En la Fig. 2, se muestran dos ejemplos del tipo de gráficos obtenidos, los cuales reflejan los resultados de la información recopilada en los grupos focales. En el gráfico A) de la Fig. 2 se pueden identificar los porcentajes de comentarios recibidos según cada subcategoría, mientras que en el gráfico B) se observan los elementos relacionados a los peligros físicos percibidos según cada grupo etario. Al haberse codificado todos los comentarios recibidos, este tipo de gráficos e información resultan provechosos dentro de un proyecto de ingeniería para considerar la opinión y percepción de las personas respecto a diferentes temas involucrados.

Por otro lado, un elemento clave para la identificación de los principales hallazgos fue el mapeo participativo, que permitió la georreferenciación tanto de lugares como de comentarios, como se muestra en la Fig. 3. En el Mapa 1 de la Fig. 3 se observa una concentración de los lugares más visitados y las rutas más frecuentadas en las zonas central y sur del distrito, mientras que los alrededores presentan un menor interés para la población. Este patrón evidencia que los lugares más visitados están conectados entre sí por las rutas de mayor tránsito peatonal.

La explicación de estos resultados se encuentra en el Mapa 2 de la Fig. 3, el cual recopila un total de 996 comentarios relacionados con el estado y mantenimiento del sistema de aceras, la percepción de seguridad y el papel de la gestión municipal y comunidad. Como principales hallazgos, el 26,81% corresponden a fortalezas y el 20,58% a oportunidades. Estos se concentran en los cuadrantes centrales del distrito, donde se destacan aceras y pasos peatonales en mejor estado, algunos de ellos parcialmente cubiertos con pavimento táctil para la inclusión de personas no videntes.

Por el contrario, un 32,83% de los comentarios señalan debilidades, como la falta de rampas, una deficiente gestión municipal y el desinterés de los vecinos en el mantenimiento de las aceras, específicamente en las zonas periféricas del distrito. Además, un 19,78% de las percepciones se refieren a amenazas, entre las que destacan el alto tránsito vehicular, la presencia de locales percibidos como peligrosos y un sistema de aguas pluviales calificado como deficiente.

En los mapas se observa cómo la ubicación de los lugares y rutas más frecuentadas coincide con las zonas donde se concentran los comentarios que destacan una mejor infraestructura para la movilidad peatonal (fortalezas y oportunidades). Esto evidencia la influencia que tiene la percepción de las personas en la toma de decisiones sobre qué ruta o lugares visitar, en función del estado y mantenimiento de la infraestructura peatonal. Lo cual, fue posible de obtener gracias a la georreferenciación de los datos.

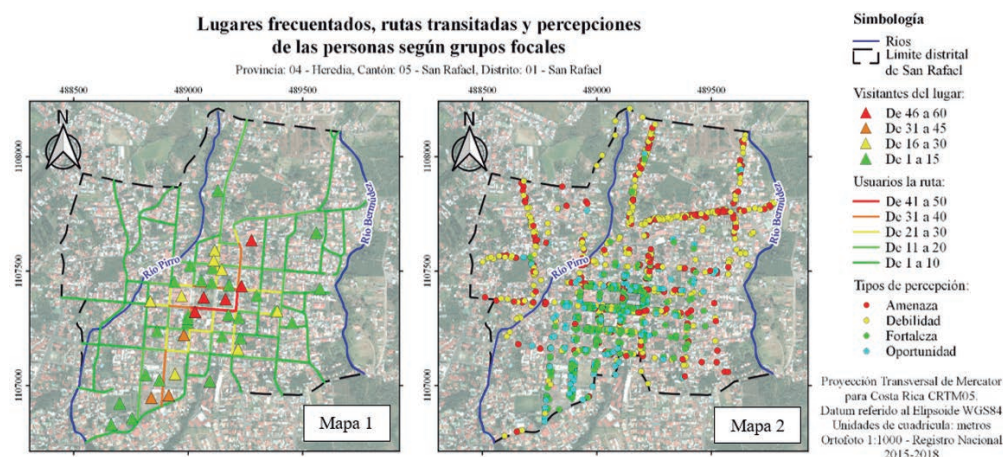


Fig. 3. Mapas de ubicación de los datos georreferenciados de los talleres con grupos focales.
Nota: Adaptado de [7].

CONCLUSIONES

La metodología propuesta busca implementar y adaptar datos cualitativos durante las fases de evaluación y toma de decisiones en proyectos de ingeniería, respondiendo a una necesidad actual: desarrollar estrategias integrales que incorporen activamente la participación y opinión de las personas, para facilitar la comprensión del entorno en el que estos se desenvuelven.

La investigación base de este trabajo presentada en Barrantes Vargas *et al.* [7], recopila las percepciones de personas de la comunidad para comprender su visión sobre el estado y accesibilidad del sistema de aceras local. Esta información cualitativa se complementó con un diagnóstico técnico de las condiciones físico-espaciales de desplazamiento, así como con el análisis de políticas, pautas y lineamientos de diseño. La integración de esta variedad de datos permitió optimizar la decisión de dónde trazar el paso de un circuito urbano accesible, mejorando la movilidad peatonal en la zona.

Para los proyectos de ingeniería, sobre todo aquellos pertinentes al ámbito de la renovación urbana, la metodología expuesta resulta de gran utilidad para asegurar la aceptación, aprovechamiento y eficiencia dentro de las propuestas generadas, ya que se integra como parte del proceso de toma de decisiones la percepción y sentir de la población que va a hacer uso o se va a ver afectada por dichos proyectos. Sin embargo, se debe considerar que al tratar con personas se requiere trabajar con integridad ante la ley y la ética para manejar los talleres y la información recopilada los mismos. Además, incluir a todos los grupos poblacionales posibles y pertinentes para obtener información integral y no sesgada por un pequeño sector de la población.

AGRADECIMIENTOS

A las asociaciones, instituciones y grupos organizados que formaron parte de los talleres, por compartir valiosa información y datos fundamentales que hicieron posible llevar a cabo la investigación y a la Municipalidad de San Rafael de Heredia por su apoyo al proyecto.

REFERENCIAS

- [1] C. S. Pawlowski et al., “Move the Neighbourhood: Study design of a community-based participatory public open space intervention in a Danish deprived neighbourhood to promote active living”, *BMC Public Health*, vol. 17, núm. 1, p. 481, feb. 2017, doi: 10.1186/s12889-017-4423-4.
- [2] J. Wu, L. Zhang, y X. Ren, “Incorporating the Co-Creation Method into Social Innovation Design to Promote Intergenerational Integration: A Case Study of a Public Square”, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, núm. 19, oct. 2022, doi: 10.3390/IJERPH191912908.
- [3] L. Natarajan, “Socio-spatial learning: A case study of community knowledge in participatory spatial planning”, *Prog Plann*, vol. 111, pp. 1–23, ene. 2017, doi: 10.1016/J.PROGRESS.2015.06.002.
- [4] J. R. Wolch, J. Byrne, y J. P. Newell, “Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities ‘just green enough’”, *Landsc Urban Plan*, vol. 125, pp. 234–244, feb. 2014, doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.017.
- [5] M. J. M. Carrillo y S. Boujrouf, “Tourism accessible to all. Evaluation of the degree of universal accessibility of the parks and gardens of Marrakech”, *PASOS Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, vol. 18, núm. 1, pp. 57–81, ene. 2020, doi: 10.25145/J.PASOS.2020.18.004.
- [6] T. Semeraro, Z. Nicola, A. Lara, F. Sergi Cucinelli, y R. Aretano, “A Bottom-Up and Top-Down Participatory Approach to Planning and Designing Local Urban Development: Evidence from an Urban University Center”, *Land (Basel)*, vol. 9, núm. 4, pp. 98–, 2020, doi: 10.3390/land9040098.
- [7] L. Barrantes Vargas, M. Sánchez Aguilar, y L. Sancho Arce, “Propuesta de Plan Proyecto de Renovación Urbana en el distrito central del Cantón de San Rafael de Heredia enfocado en un circuito urbano accesible”, Universidad de Costa Rica, San José, 2024. Consultado: el 31 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/items/343ebdb8-581e-4cc8-ab62-b69459bf59a3>
- [8] V. Braun y V. Clarke, “Using thematic analysis in psychology”, *Qual Res Psychol*, vol. 3, núm. 2, pp. 77–101, 2006, doi: 10.1191/1478088706QP063OA.
- [9] K. Barrantes-Chaves, “Fear of Crime Beyond the Walls: Effects of Gated Communities in Neighbouring Public Spaces : the Case of the Greater Metropolitan Area of Costa Rica”, University College London (UCL), London, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10128120/>

Interfaz de lenguaje natural para un sistema de información del transporte público

A Natural Language Interface for a Passenger Information System in Public Transportation

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

Palabras clave:

Diseño de servicios, inteligencia artificial, ingeniería de sistemas, transporte público inteligente.

Keywords:

Service design, artificial intelligence, systems engineering, intelligent public transportation.

RESUMEN

La información para las personas usuarias del transporte público es un elemento esencial para promover su uso y para mejorar el nivel de satisfacción con el servicio. En la era de la digitalización, el servicio de transporte público debe proveer información oportuna por medio de múltiples interfaces o “puntos de contacto” con sus usuarios, y las herramientas de inteligencia artificial generativa, particularmente los modelos extensos de lenguaje (LLM), ofrecen oportunidades inéditas para modernizar y facilitar el acceso a la información necesaria, utilizando lenguaje natural en consultas desestructuradas en virtualmente cualquier idioma.

Este artículo propone el diseño y un prototipo de una nueva interfaz de chat con inteligencia artificial generativa para hacer consultas del servicio de transporte público, creado con el protocolo de contexto de modelos (MCP) —un estándar abierto para facilitar información de contexto a modelos de lenguaje— en conjunto con Infobús® API, una fuente de datos basada en GTFS, la especificación de suministros de datos abiertos para el transporte público, y como parte del plan piloto del sistema de información bUCR de la Universidad de Costa Rica. El resultado permite apreciar el potencial de aprovechamiento en esta aplicación y sus ventajas de accesibilidad.

ABSTRACT

Information for public transportation users is an essential element for promoting its use and for improving satisfaction with the service. In the era of digitalization, public transportation services must provide timely information through multiple interfaces or “touchpoints” with their users, and generative artificial intelligence tools—particularly large language models (LLMs)—offer unprecedented opportunities to modernize and facilitate access to necessary information, using natural language in unstructured queries in virtually any language.

This article proposes the design and a prototype of a new generative AI chat interface for querying public transportation services, built using the Model Context Protocol (MCP)—an open standard for providing

contextual information to language models—in conjunction with the Infobús® API, a data source based on GTFS, the open data specification for public transportation, and as part of the pilot plan of the BUCR information system of the University of Costa Rica. The result demonstrates the potential of this application and its accessibility advantages.

I. INTRODUCCIÓN

Los modelos extensos de lenguaje (LLM, Large Language Models) son revolucionarios por su capacidad de comprensión del lenguaje y de razonamiento, convirtiéndose actualmente en una herramienta esencial para la búsqueda y síntesis de información. Pero esta tecnología tiene limitantes a la hora de proveer datos actualizados o en tiempo real. Esto es así por la naturaleza de sus modelos, los cuales, necesariamente, están limitados por información acotada en el tiempo al momento del entrenamiento de los mismos. Por ejemplo, GPT-4o de OpenAI tiene datos nuevos hasta el 30 de septiembre de 2023, según su página web.

Sin embargo, hay protocolos emergentes que permiten a los LLM interactuar con nuevas fuentes de datos, tales como documentos locales o interfaces de programación de aplicaciones (API). Esto les concede nuevas competencias para responder preguntas con la información más reciente o para hacer transacciones con otros sistemas, convirtiéndolos efectivamente en agentes de inteligencia artificial, es decir, entidades capaces de interactuar con su entorno y actuar sobre él, en respuesta a las solicitudes hechas con lenguaje natural.

El protocolo de contexto de modelos (MCP, Model Context Protocol) es un estándar abierto desarrollado por Anthropic –uno de los principales actores en la investigación y el desarrollo de inteligencia artificial en la actualidad– con el fin de proveer contexto a las respuestas de los LLM. Según su visión, “MCP proporciona una forma estandarizada de conectar modelos de inteligencia artificial con diferentes fuentes de datos y herramientas”. En los sistemas de información del transporte público, esto abre una ventana valiosa de oportunidades que pueden transformar cualitativamente la interacción de las personas usuarias con los datos del servicio [1]. La especificación del suministro de datos abiertos del transporte público (GTFS, General Transit Feed Specification) expone prácticamente todos los datos necesarios para hacer un uso efectivo del servicio [2], pero estos datos son difíciles de explorar y comprender para los seres humanos y necesitan de interfaces que simplifiquen su comprensión. Esto ya lo hacen las aplicaciones especializadas en planificación de viajes multimodales, como Google Maps y Transit, pero el lenguaje natural sería aún más accesible para un público más amplio y, posiblemente, permitiría

consultas más rápidas y desestructuradas.

Este artículo presenta una interfaz de chat que acepta consultas en lenguaje natural, las cuales procesa para hacer búsquedas de datos, por medio de MCP, en el web API Infobús®, desarrollado en [3], y con el fin de ofrecer una respuesta con datos en tiempo real y/o actualizados y presentada de vuelta en lenguaje natural también. El servidor MCP está disponible en GitHub en la dirección

<https://github.com/simovilab/infobus-mcp>, y será aquí llamado Infobús MCP. La documentación del web API está en <https://infobus.bucr.digital/api/docs>.

TransitGPT [4] es un ejemplo de un sistema pionero con objetivos similares, pero con una implementación ad hoc. Otros LLM han sido evaluados en tareas de interpretación de datos de transporte público [5], sin embargo, no utilizan vínculos directos con los datos del servicio, como la posibilidad que ofrece MCP en esta propuesta.

La sección II presenta los principios de diseño y las tecnologías seleccionadas, la sección III detalla la estructura del servidor MCP, la sección IV explica las herramientas necesarias para maximizar el aprovechamiento de los datos presentes en el plan piloto, la sección V muestra evidencia del funcionamiento del prototipo y, finalmente, están las conclusiones.

CUADRO I
PARÁMETROS DE CONSULTA DE `NEXT-TRIPS` / EN INFOBÚS API

Parámetro	Tipo	Ejemplo	Descripción
stop_id	string	bUCR_0_03	Búsqueda de próximos viajes en una parada particular.
route_id	string	L1	Búsqueda de próximos viajes filtrada por parada y por ruta.
timestamp	string	2024-07-31T16:12:25	Fecha y hora de referencia en el futuro para buscar próximos viajes a partir de ese momento.

II. METODOLOGÍA

La propuesta está desarrollada siguiendo los mismos principios presentados en [6] y en [7], los cuales buscan la **interoperabilidad**, para ser compatibles con estándares y arquitecturas internacionales, razón por la cual MCP es elegido como plataforma. También promueve la **neutralidad tecnológica**, para evitar el *vendor lock-in* (uso restringido o propietario de una tecnología o servicio). En este sentido, aunque MCP es propuesto por Anthropic, no hay ninguna restricción para elegir el proveedor del modelo de lenguaje, siempre y cuando estén ya adaptados para MCP, y OpenAI, Google y Meta, entre otros, ya están desarrollando sus *kits* de desarrollo de software (SDK) para este fin. Y, finalmente, procura la **unicidad de la información** del sistema, desde el punto de vista de las personas usuarias, para evitar el fraccionamiento y la inconsistencia de los datos, y en el caso de Costa Rica, la carencia es crítica [8]. El objetivo del plan piloto es unificar esta información. Todo lo anterior respalda la elección de MCP como plataforma de gestión de la información de contexto en la aplicación prevista.

En este artículo son presentados los resultados del prototipo de un servicio de chat con un cliente local y un servidor MCP con la implementación de la herramienta `get-next-trip`, para ofrecer el servicio de información para pasajeros desde un chat en la página web o en otros canales de comunicación.

Las pruebas son hechas con un cliente Claude Desktop de Anthropic y con un servidor implementado utilizando Python y el SDK `mcp` (disponible en <https://pypi.org/project/mcp/>), con la implementación de MCP, y el paquete `httpx` para correr un servidor local de pruebas.

Sobre el API web Infobús La API web de Infobús® es propuesta en [3]. Es un proveedor de datos para servicios de información de transporte público, como páginas web, pantallas informativas, aplicaciones móviles, *chatbots* y otros, con datos basados en GTFS pero no limitados a este, sino que además ofrece información complementaria, como datos del clima o emergencias locales no relacionadas con el transporte público, por ejemplo. Infobús® es una marca registrada de la Universidad de Costa Rica.

Los ejemplos provistos 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 el Laboratorio de Sistemas Inteligentes de Movilidad (SIMOVI) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y la Oficina de Servicios Generales (OSG) de la UCR, en asociación con otras instancias internas y externas.

En este prototipo es utilizado el *endpoint* `next-trips/`, cuyos parámetros de búsqueda están en la tabla 1. Por su parte, la respuesta del *endpoint* tiene los campos mostrados en el CUADRO II.

CUADRO II
CAMPOS DE LA RESPUESTA 200 OK DE `NEXT-TRIPS/` EN INFOBÚS API

Parámetro	Tipo	Descripción
<code>stop_id</code>	<i>string</i>	Identificador de la parada según GTFS Schedule.
<code>timestamp</code>	<i>string</i>	Hora de referencia para buscar próximos viajes.
<code>next_arrivals [</code>	array	Datos de cada próxima llegada
<code>trip_id</code>	<i>string</i>	Identificador del viaje según GTFS Schedule
<code>route_id</code>	<i>string</i>	Identificador de la ruta según GTFS Schedule
<code>route_short_name</code>	<i>string</i>	Nombre corto de la ruta
<code>route_long_name</code>	<i>string</i>	Nombre largo de la ruta
<code>trip_headsign</code>	<i>string</i>	Destino del viaje
<code>wheelchair_accessible</code>	<i>string</i>	Accesibilidad para sillas de ruedas
<code>arrival_time</code>	<i>string</i>	Hora de llegada a la parada
<code>departure_time</code>	<i>string</i>	Hora de salida de la parada
<code>in_progress</code>	<i>boolean</i>	Indica si el viaje está en progreso
<code>progression [</code>	array	Datos del viaje en progreso
<code>position_in_shape</code>	<i>float</i>	Porcentaje de progreso del viaje en la trayectoria
<code>current_stop_sequence</code>	<i>integer</i>	Secuencia de la parada actual
<code>current_status</code>	<i>string</i>	Estado actual del vehículo en relación con la parada
<code>occupancy_status</code>	<i>string</i>	Estado de ocupación del vehículo
<code>]</code>		
<code>]</code>		

III. ESTRUCTURA DEL SERVIDOR MCP

La arquitectura básica del prototipo está mostrada en la figura 1, donde es posible apreciar el cliente MCP, que para la prueba fue utilizado Claude Desktop.

El servidor hace una consulta al *endpoint* `next-trips/` de Infobús API y construye una respuesta para consumo del LLM con un formato simplificado, priorizando el lenguaje natural en inglés y no la sintaxis de GTFS, como `departure_time`, por ejemplo. El LLM utiliza este contexto para ofrecer una respuesta amplia en el chat con formato apropiado e, inclusive, algunas conclusiones adicionales, como la estimación de la frecuencia de viajes, el cual no es explícito en la respuesta del API.

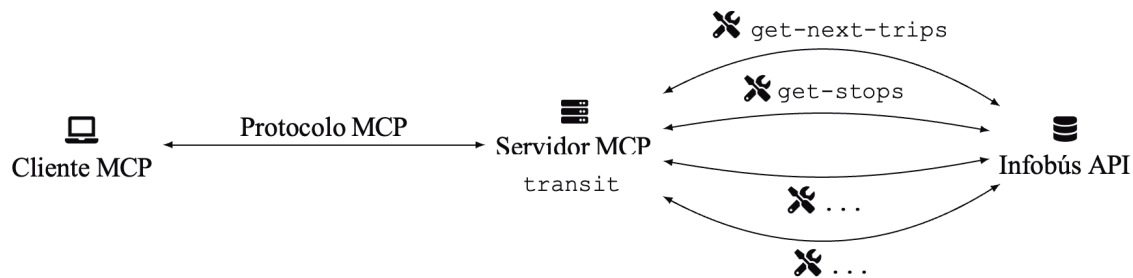


Fig. 1. Arquitectura básica del servidor MCP `transit` para recopilar información de Infobús API por medio de un cliente LLM compatible con MCP, y por medio de las herramientas `get-next-trips` y otras previstas.

IV. DISEÑO DE LAS HERRAMIENTAS

Según la definición en [6], 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. En concordancia con GTFS, que representa una referencia consolidada globalmente, la referencia citada propone que un sistema de información del servicio debe proveer información en, al menos, siete categorías. Con base en lo anterior, es posible hacer una descripción cualitativa de las herramientas necesarias para ofrecer una base de contexto suficiente para las preguntas hechas a un LLM en el chat.

- **Agencia operadora**

 `get-agency`  `agency/`

Información de contacto y medios de atención al cliente

- **Rutas**

 `get-routes`  `routes/`

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

- **Paradas**

✂ `get-stops`

🔗 `stops/, route-stops/`

■ Ubicación, infraestructura, facilidades, seguridad y accesibilidad

- **Viajes y horarios**

✂ `get-next-trips`

🔗 `next-trips/`

■ Tiempos de salida de cada viaje y para cada parada

- **Días de operación**

✂ `get-calendar`

🔗 `calendar/, calendar-dates/`

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

- **Tarifas**

✂ `get-fares`

🔗 `fare-rules/, fare-attributes/`

■ Detalles del precio, métodos de compra y de pago

- **Datos geoespaciales y mapas**

✂ `get-maps`

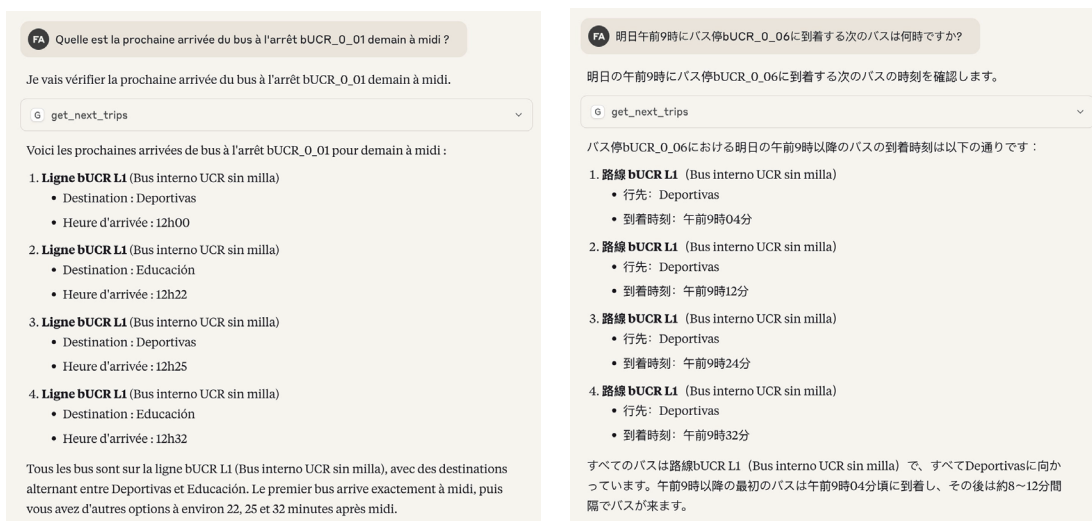
🔗 `geo-shapes/, geo-stops/`

■ Mapas de los recorridos de las rutas y ubicación de las paradas

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Según las pruebas realizadas, la consulta puede ser hecha en virtualmente cualquier idioma, y la complejidad de la consulta puede ser destilada por el LLM, que la traduce en una o varias consultas al web API para entender mejor el contexto con las herramientas disponibles. Las figuras 2a y 2b muestran los resultados del chat con el cliente Claude Desktop a preguntas similares hechas en francés y japonés, respectivamente.

Claude Desktop, y posiblemente otros LLM de tamaños y similares, tiene la capacidad de transformar las preguntas en lenguaje natural en los parámetros necesarios para hacer las consultas al web API.



(a) Consulta hecha en francés.

(b) Consulta hecha en japonés.

Fig. 2. Consultas de horarios en distintos idiomas para distintos momentos.

Por ejemplo, el siguiente es un fragmento de código de la definición de la herramienta `get-`

```
next-trips. @mcp.tool()
```

```
async def get_next_trips(stop_id: str, timestamp: str) -> str:
```

```
    """Get next trips for a given bus stop in a given day and time.
```

```
    Args:
```

```
        stop_id: GTFS stop ID
```

```
        timestamp: Timestamp in ISO 8601 format (YYYY-MM-DDTHH:MM:SS)
```

```
    """
```

```
url = f"{INFOBUS_API_BASE}/next-
trips/" params = {
    "stop_id": stop_id,
    "timestamp": time-
stamp,
}
...
```

Aquí es posible observar que un parámetro es `timestamp`, definido en el formato `YYYY-MM-DD-THH:MM:SS` del estándar ISO 8601. Al hacer una pregunta como “¿Cuál es el siguiente bus en la parada X para mañana al mediodía?”, Claude correctamente infiere el día actual y entrega la fecha y hora como `2025-05-19T12:00:00`.

CONCLUSIONES

1. Utilizando el protocolo de contexto de modelos (MCP) es posible desarrollar herramientas (*tools*) para ofrecer información de contexto sobre el servicio de transporte público a un cliente LLM (modelo extenso de lenguaje) arbitrariamente elegido (con soporte para MCP).
2. La web API Infobús® ofrece datos GTFS y la suficiente flexibilidad para encontrar información útil para responder preguntas usuales de las personas usuarias con la intermediación de MCP y el uso de lenguaje natural.
3. La accesibilidad y la facilidad de uso del servicio de transporte público pueden tener un impacto positivo a través del uso extendido de herramientas como la propuesta en este artículo, la cual debe superar la etapa de prototipo para hacer múltiples pruebas iterativas con las personas usuarias para evaluar su idoneidad.
4. El potencial de este tipo de aplicaciones es todavía inexplorado, por la reciente liberación de MCP y la progresiva adopción entre los actores más importantes de la inteligencia artificial, pero es previsible una revolución en la forma de obtener datos en tiempo real, que representa una perfecta aplicación para el transporte público.

REFERENCIAS

- [1] L. Da, T. Chen, Z. Li et al., «Generative ai in transportation planning: A survey,» arXiv preprint arXiv:2503.07158, 2025.
- [2] MobilityData, ed. «GTFS Schedule Overview.» (2022), dirección: <https://gtfs.org/schedule/>.
- [3] F. Abarca, D. Segura y J. Vargas, «Concentrador de datos en tiempo real para servicios de información en el transporte público,» en Revista Ingeniería, oct. de 2024.
- [4] S. Devunuri y L. Lehe, «TransitGPT: A Generative AI-based framework for interacting with GTFS data using Large Language Models,» arXiv preprint arXiv:2412.06831, 2024.

- [5] S. Ying, Z. Li y M. Yu, «Beyond words: Evaluating large language models in transportation planning,» *Geo-spatial Information Science*, págs. 1-23, 2025.
- [6] F. Abarca, «Sistema de información para las personas usuarias del transporte público en Costa Rica,» en *Revista Ingeniería*, oct. de 2024.
- [7] F. Abarca, D. Murillo, D. Segura et al., «A System-Level Design for a Public Transportation Information System in Costa Rica,» en *IEEE Xplore*, oct. de 2024.
- [8] F. Abarca y M. Araya, «Estudio de la información del servicio de transporte público en Costa Rica,» en *Revista Ingeniería*, oct. de 2024.

Análisis de movilidad activa para conectar las fincas 2 y 3 de la UCR

Active mobility analysis to connect Finca 2 and Finca 3 of the UCR

Hubert Rojas-González

Estudiante egresado, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

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

Diana Jiménez-Romero

Profesora e investigadora, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: diana.jimenez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

CICLISTAS, encuesta, evaluación de infraestructura, movilidad activa, peatones.

Keywords:

ACTIVE MOBILITY, cyclists, infrastructure assessment, pedestrians, survey.

RESUMEN

Este análisis forma parte de un proyecto final de graduación que evaluó la infraestructura de movilidad activa entre la Finca 2 y la Finca 3 de la UCR antes de construir un puente peatonal y ciclista. Se analizaron el Índice de Condición de Aceras (ICA) y el Índice de Compatibilidad para Bicicletas (ICB), además de una encuesta sobre hábitos de movilidad y percepción del equipamiento. Los resultados señalaron deficiencias en infraestructura, conflictos entre conductores y ciclistas, así como áreas clave para intervención. También se identificaron posibles nuevos hábitos de movilidad y la preferencia por caminar, lo que ayudó a definir mejoras en las rutas hacia la futura conexión entre ambos espacios.

ABSTRACT

This analysis is part of a final graduation project that evaluated active mobility infrastructure between Finca 2 and Finca 3 of the UCR before constructing a pedestrian and cyclist bridge. The Sidewalk Condition Index (ICA for its acronym in spanish) and the Bicycle Compatibility Index (BCI) were analyzed, along with a survey on mobility habits and users' perceptions of available facilities. The results highlighted infrastructure deficiencies, conflicts between drivers and cyclists, and key areas for intervention. Additionally, new mobility habits and preferences among survey participants were identified, helping to define improvements for the routes leading to the future university connection. Community analysis, which helps prioritize intervention areas for the future geometric design of the circuit.

I. INTRODUCCIÓN

La separación en tres fincas en la que se distribuye la Ciudad Universitaria Rodrigo Facio ha creado dinámicas de movilidad particulares y desafíos de conectividad entre estos espacios. Asimismo, durante los últimos 10 años se han construido y reubicado edificios – incluidos centros de investigación, enseñanza y servicios – de la Finca 1 a las fincas 2 y 3, lo que ha redistribuido los viajes internos [1]. Para facilitar traslados seguros y eficientes, la Oficina Ejecutora del Programa de Inversiones (OEPI) propuso crear un puente peatonal y ciclista entre las fincas 2 y 3, similar al existente sobre Calle Masis entre las fincas 1 y 2.

Fundamentado en la propuesta de la OEPI, una solicitud del Consejo de Rectoría sobre la necesidad de potenciar la infraestructura para la movilidad activa [2], el Acuerdo 7501 del Consejo Universitario [3] que establece la Carta de los Derechos del Peatón y el Plan Integral de Movilidad Activa [4], este estudio, que forma parte de un trabajo final de graduación [5] de la Escuela de Ingeniería Civil, se planteó evaluar la infraestructura peatonal y ciclista entre la Finca 2 y la Finca 3.

En este contexto, este análisis tuvo como objetivos: 1) Identificar el perfil demográfico y las preferencias de movilidad de quienes viajan entre Finca 2 y Finca 3. 2) Evaluar la infraestructura peatonal de las fincas 2 y 3 mediante inventario, identificación de líneas de deseo, pasos peatonales y secciones sin acera, para determinar necesidades de intervención. 3) Calcular el nivel de servicio para bicicletas dentro de ambas fincas según criterios de diseño y compatibilidad con este medio de transporte. 4) Analizar la seguridad vial de las vías compartidas con ciclistas mediante listas de chequeo. 5) Elaborar medidas de intervención basadas en los resultados obtenidos para mejorar la infraestructura estudiada.

II. METODOLOGÍA

La estrategia metodológica empleada para el desarrollo de este trabajo incluyó en primer lugar la aplicación de una encuesta. Para ello se elaboró un cuestionario en línea en la plataforma *LimeSurvey* que permitió identificar los medios de transporte utilizados para viajar entre fincas, las rutas más usadas por los peatones, la disposición de cambiar el medio de transporte habitual por la caminata, la percepción de la infraestructura ideal (para caminar y andar en bicicleta), entre otros. La población objeto de estudio fueron estudiantes, personas funcionarias y visitantes de la Sede Rodrigo Facio únicamente.

En segundo lugar, se calculó el Índice de Condición de Acera (ICA). En este caso, se aplicó la Guía de inventario y evaluación de aceras [6], para determinar el estado de la infraestructura peatonal de la Finca 2 y la Finca 3. Esta guía dividió las aceras en secciones de 15 m a 150 m según sus características y asignó una calificación de 0 a 100, donde menos de 40 indicaba una mala condición, de 41 a 80 una regular y de 81 a 100 una acera en buen estado.

Por último, se calculó el Índice de Compatibilidad para Bicicletas (ICB), el cual – a través de la Guía de diseño y evaluación de ciclovías para Costa Rica [7] – determinó un nivel de servicio para ciclistas dentro de las vías de las fincas 2 y 3. Este nivel se asoció a una calificación entre A

y F, donde la primera representa condiciones de flujo vial, seguridad y confort óptimas para los ciclistas, mientras que la otra representa todo lo contrario.

Paralelamente, se llevó a cabo un levantamiento fotográfico y mapeo de líneas de deseo (sendas informales), pasos peatonales y rampas (estado y disponibilidad) y aspectos que atentan contra la seguridad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados de la encuesta

En primera instancia la Fig. 1 ilustra gráficamente la cantidad de personas que contestaron la encuesta según el modo de transporte usado, ya que se determinó una muestra estratificada para cada medio.

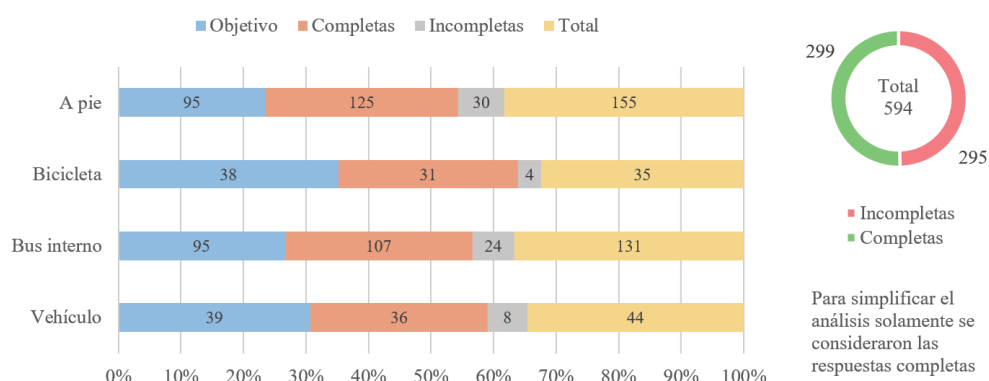


Fig. 1. Distribución de participantes de la encuesta.

Se destaca que para el modo de transporte en bicicleta no se alcanzó la totalidad de respuestas según la muestra definida, por lo tanto, las conclusiones en relación con este medio deberán tomarse con cautela.

Por su parte, la Fig. 2 muestra una comparación entre las preferencias de viaje de estudiantes y funcionarios (as) según los resultados de un estudio del 2015 [1] y el comportamiento observado durante el 2024 producto de esta investigación. No se incluyeron los visitantes dado que su participación en la encuesta fue poco representativa.

A raíz de lo observado se pueden identificar posibles cambios en las tendencias de movilidad para viajar entre fincas, entre ellas: una disminución del uso del autobús interno, que puede responder a la construcción del puente peatonal y ciclista entre Finca 1 y Finca 2 inaugurado en 2020. También se destaca un uso constante de la caminata en estudiantes y funcionarios (as), y un incremento del uso del vehículo privado para viajar entre fincas, el cual puede deberse al aumento en la capacidad de parqueo de la Finca 2 tras la construcción de los estacionamientos verticales (P206 y P208) en el periodo 2014 – 2017 y la apertura al público de estos espacios, antes limitado solo a quienes tenían *marchamo UCR* [8].

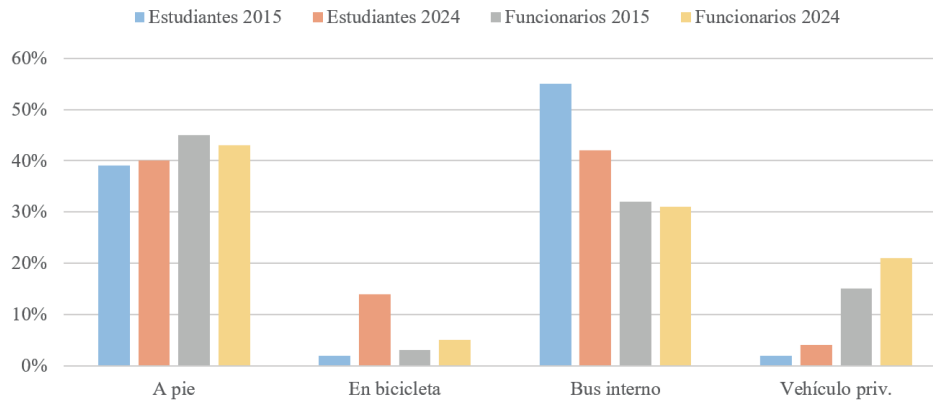


Fig. 2. Preferencias de viaje entre 2015 y 2024.

Sobre el aumento del uso de la bicicleta en estudiantes y funcionarios (as), se puede decir que la inclusión de ciclo-parqueos en los proyectos de infraestructura, desarrollados en los últimos 10 años por la OEPI, puede responder a este cambio. Además, se puede suponer que los usuarios se ven motivados por llegar rápido y evitar la congestión que hoy sufren las vías aledañas a la ciudad universitaria [9].

B. Resultados de la evaluación de la infraestructura peatonal

La evaluación realizada permitió crear una base de datos para cada acera estudiada, la cual consta de 76 entradas (secciones de acera) y contiene a detalle cada aspecto evaluado según la metodología empleada [6]. De esta forma, los resultados del ICA se exhiben en el mapa de la Fig. 3, en el cual se observa que de 16 secciones evaluadas en la Finca 3 solo 1 se calificó como mala (en rojo), 3 como regular (en amarillo) y el resto como buenas (en verde). Para la Finca 2 la mayoría de las secciones evaluadas presentaron una buena condición; de 60 solo 6 se calificaron en estado regular.

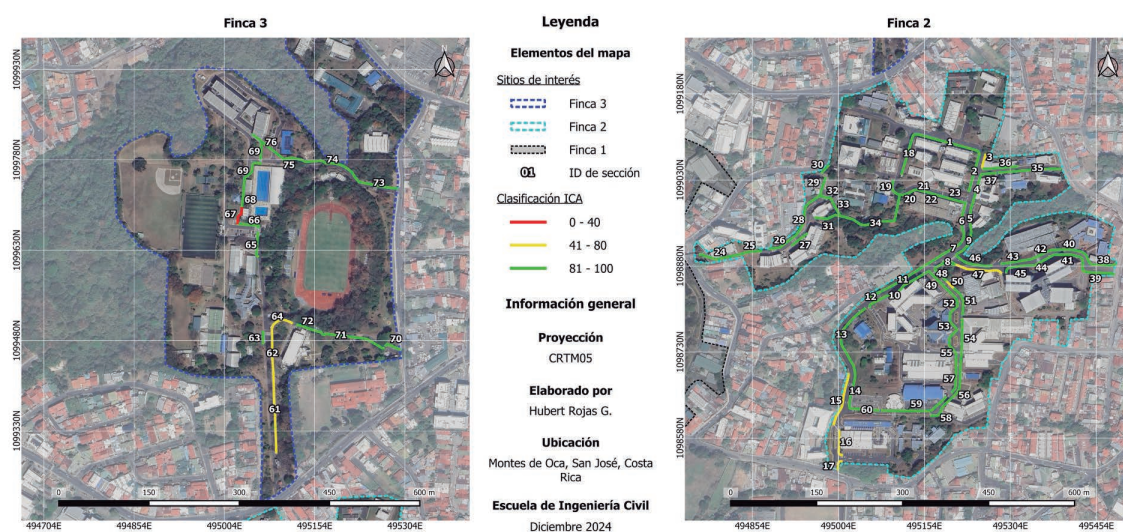


Fig. 3. ICA de la Finca 3 y la Finca 2.

Aunque los resultados del ICA sugieren una buena condición en la mayoría de las aceras, durante el trabajo de campo se evidenciaron deterioros estructurales y afecciones en el desempeño funcional de las aceras, comprometen la seguridad de los peatones y limitan el acceso al espacio físico. Entre los hallazgos más críticos están: anchos de acera menor al límite establecido (1.20 m según INTEW9 [10]), obstrucciones que reducen el ancho efectivo de las aceras, ausencia de rampas y losas podotáctiles, desnudamiento y escalonamiento de la superficie, huecos y ausencia de pasos peatonales. Así mismo, se encontraron secciones sin acera y *trillos* o sendas informales que utilizan los peatones como atajo. Las primeras destacan las necesidades que enfrenta el equipamiento peatonal para crear una red integral de aceras y facilidades para quienes caminan entre ambas fincas. Las segundas ponen en evidencia la disposición de los usuarios por llegar rápido a sus destinos, sin importar que no haya infraestructura, comprometiendo su seguridad.

C. Resultados de la evaluación de la infraestructura ciclista

Al igual que para la infraestructura peatonal, en este caso también se consolidó una base de datos para la infraestructura ciclista. La Fig. 4 resume los resultados del ICB, en donde se observa que la mayoría de los tramos evaluados presentaron un nivel de servicio alto (B y C en color verde). No obstante, dado que la metodología empleada se desarrolló para un país extranjero (EEUU) con características geográficas y de tránsito ajenas a la realidad costarricense, y por ende distintas a la infraestructura vial universitaria, estos resultados no reflejan en su totalidad la compatibilidad verdadera de las vías compartidas con ciclistas.

Debido a esta particularidad, se optó por evaluar con listas de chequeo la seguridad vial de los ciclistas. Entre los hallazgos que más comprometen la integridad de estos usuarios se encuentran: ausencia de señalización vial que advirtiera la presencia de ciclistas, deterioro de la capa asfáltica, obstáculos en la vía como: huecos o pozos de registro hundidos en la superficie y, por último, se determinó que en todos los tramos la velocidad vehicular del percentil 85 excedía los límites de velocidad establecidos en 25 km/h.

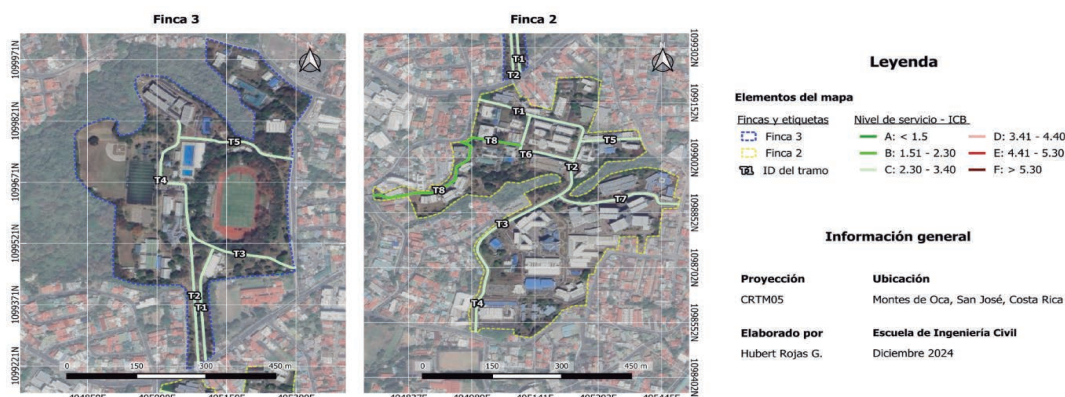


Fig. 4. ICB de las vías compartidas con ciclistas en la Finca 3 y la Finca 2.

D. Medidas de intervención

Para la implementación de las medidas de intervención, se establecieron cuatro criterios de priorización que deberían considerar las entidades encargadas del mantenimiento de la infraestructura evaluada y de la construcción del futuro puente. Estas son: la cercanía a la ubicación del puente, las rutas más usadas para viajar entre fincas, la opinión de los usuarios y los sitios de mayor concentración de viajes (estas últimas de acuerdo con lo expresado en la encuesta y los resultados completos, no abordados aquí). En orden de mayor prioridad y bajo costo se muestran algunas de las medidas de intervención definidas:

- E. Utilizar la base de datos obtenida del proceso evaluativo del ICA e ICB para actualizar el estado de la infraestructura (peatonal y ciclista) y facilitar su intervención con mayor periodicidad.
- F. Prever en futuros proyectos, la ubicación de postes, letreros y equipamiento adicional a la infraestructura, para evitar que se conviertan en obstáculos.
- G. Incorporar medidas de control de velocidad en el mantenimiento de vías compartidas, como reductores y señalización vertical.
- H. Desarrollar un plan a mediano plazo para señalar horizontal y verticalmente las vías compartidas de Finca 2 y Finca 3.
- I. Realizar mantenimiento correctivo a las aceras identificadas con anchos menores a 1.20 m.
- J. Incluir la nivelación de pozos de registro en el mantenimiento vial rutinario.
- K. Retirar, cuando sea posible, obstrucciones que reduzcan el ancho de aceras a menos de 1.20 m.
- L. Planificar la instalación de techado y zonas de descanso en la infraestructura peatonal entre Finca 2 y Finca 3, según las preferencias expresadas en la encuesta.
- M. Fomentar programas que promuevan el respeto a ciclistas en vías compartidas de la ciudad universitaria, como modelo de convivencia nacional.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las facilidades peatonales presentan deficiencias en accesibilidad, como aceras estrechas, obstrucciones, ausencia de losas podotáctiles y pasos peatonales ausentes o a nivel de calle.

El cálculo del ICB y la evaluación de seguridad vial evidenciaron que las vías compartidas en Finca 2 y Finca 3 requieren mayor atención. Es necesario fortalecer la señalización y otras intervenciones físicas, así como promover el respeto de los conductores hacia los límites de velocidad. La desobediencia y otros conflictos reportados en la encuesta (no abordados aquí) afectan la efectividad del modelo y ponen en riesgo a peatones y ciclistas.

Es importante prestar atención al uso dado a las líneas de deseo, ya que mientras algunas pueden servir como conexiones potenciales entre espacios de la Universidad, otras podrían impulsar la

movilidad activa por medio de circuitos de atletismo, recreación, senderismo o incluso campo traviesa, especialmente en la Finca 3, que registró mayor cantidad de sendas peatonales no oficiales.

Se determinó que los hábitos de desplazamiento de las personas que viajan entre fincas presentaron variaciones respecto a los identificados en el 2015 [1], lo cual podría sugerir posibles cambios en la manera que se movilizan los habitantes de la Universidad. Estos cambios podrían deberse a la inauguración del puente peatonal entre Finca 1 y Finca 2 en 2020 (ausente en 2015). También pueden estar influenciadas por un posible sesgo de participación, ya que la muestra del 2015 fue mayor que la de esta investigación.

El análisis de las nuevas tendencias de movilidad según los medios de transporte usados, los puntos de mayor concentración de viajes y las rutas peatonales más usadas (no abordados aquí) evidencian una alta demanda de un conector peatonal y ciclista entre la Finca 2 y la Finca 3. Su construcción podría incentivar el traslado a pie y en bicicleta, reduciendo la saturación del bus interno, mejorando la seguridad al evitar el uso de la vía pública y fortaleciendo la movilidad no motorizada en el campus, en línea con el Plan Integral de Movilidad Activa [4].

Se recomienda realizar un análisis de costo-beneficio sobre la construcción de un futuro puente peatonal y ciclista que conecte la Finca 2 y la Finca 3 para garantizar que inversiones de este tipo sean exitosas. Para ello se recomienda considerar los resultados de esta investigación, así como los beneficios a la salud en la población universitaria experimentados tras la construcción del puente entre Finca 1 y Finca 2, expuestos en el trabajo de graduación de Cheng [11] que sirve como insumo para la evaluación de proyectos de infraestructura dirigidos a la movilidad de las personas.

En caso de que se decida no construir un conector peatonal y ciclista entre la Finca 2 y la Finca 3, se sugiere realizar, en coordinación con la Municipalidad de Montes de Oca, un diagnóstico de los puntos de la vía pública que permiten cruzar entre ambos espacios para determinar qué riesgos existen y qué mejoras se pueden implementar en estos sitios para optimizar la seguridad, el confort y el tránsito de los habitantes de la Universidad que requieran viajar a pie o en bicicleta entre la Finca 2 y la Finca 3.

Finalmente, se advierte que los resultados del cuestionario aplicado pueden estar afectados por un sesgo de participación, ya que no se aplicaron herramientas de ajuste para compararlos con una base de datos completa, por lo que cualquier inferencia debe hacerse con cautela.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UCR y a la educación pública, que cultivaron mi interés por la ciencia, la acción social y el arte. A mi directora de tesis, Diana Jiménez, por su apoyo incondicional, y a mis lectores Henry Hernández, Esteban Camacho y Javier Zamora. A la oficina de Divulgación e Información, la USVT del Lanamme, así como la oficina de Seguridad y Tránsito por su colaboración en el estudio.

REFERENCIAS

- [1] Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS), «Estudio de impacto vial del Plan Maestro Urbanístico de la Universidad de Costa Rica: Resultados de la Encuesta de Viajes,» Universidad de Costa Rica, San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica, 2016.
- [2] Consejo de Rectoría, «Diagnóstico sobre uso del espacio, movilidad, paisaje y ambiente para la formulación del plan de ordenamiento territorial Campus Universitario Rodrigo Facio Brenes,» 2021. [En línea]. Available: <https://oepi.ucr.ac.cr/pot/>.
- [3] Consejo Universitario, «Acuerdo 7501,» Universidad de Costa Rica, San José, 2008.
- [4] C. K. O`neal, «Plan Integral de Movilidad Activa,» 2013. [En línea]. Available: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2013/06/06/rector-anuncia-plan-integral-de-movilidad-activa.html>. [Último acceso: Mayo 2025].
- [5] H. Rojas-González, «Análisis de trayectorias de movilidad activa para integrar un futuro puente entre Finca 2 y Finca 3 de la Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,» Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2025.
- [6] Lanamme-UCR, «Guía de Inventario y evaluación de Aceras,» Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA), San José, Costa Rica, 2017.
- [7] Lanamme-UCR, «Guía de diseño y evaluación de ciclovías para Costa Rica,» Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), San José, Costa Rica, 2015.
- [8] P. Torres-Vargas, «UCR implementa nuevo sistema de ingreso a parqueos,» 2018. [En línea]. Available: <https://semanariouniversidad.com/universitarias/ucr-implementa-nuevo-sistema-de-ingreso-a-parqueos/>. [Último acceso: mayo 2025].
- [9] Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS), Estudio de impacto en el transporte del crecimiento planeado para la Finca 3 de la Universidad de Costa Rica, San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2018.
- [10] INTECO, «INTE W9: Accesibilidad de las personas al medio físico. Vías de circulación peatonales horizontales.,» Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica, San José, 2022.
- [11] S. Cheng y H. Hernández, «Estudio de la factibilidad de la incorporación del componente salud en los procesos de evaluación de proyectos de transporte,» Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2020.

Evaluación del efecto sonoro producido en la operación de un tramo de Circunvalación Norte

Evaluation of the sound effect produced during the operation of a section of the Northern Ring Road

Diego Masis Guntanis

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

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

Nidia Cruz Zúñiga

Docente Catedrática, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: nidia.cruz@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Ruido ambiental, impacto sonoro, infraestructura vial, contaminación acústica, percepción ciudadana, medidas de mitigación.

Keywords:

Environmental noise, noise impact, road infrastructure, noise pollution, public perception, mitigation measures.

RESUMEN

Este trabajo de investigación evalúa el impacto sonoro generado por la Etapa 1 del proyecto de Circunvalación Norte (Ruta Nacional N39) en San José, Costa Rica, durante su fase operativa. La creciente preocupación de los residentes cercanos por el aumento del ruido motivó un estudio detallado que incluye una metodología mixta de mediciones en campo, análisis de percepción ciudadana y comparación con la normativa vigente. Se seleccionaron dos urbanizaciones dentro del cantón de Tibás como zonas de estudio. En estas se realizaron mediciones en distintos puntos estratégicos siguiendo criterios técnicos. Además, se llevó a cabo un sondeo mediante un cuestionario cerrado para medir la percepción del impacto según las personas vecinas. Los resultados evidencian niveles de ruido que, en algunos casos, superan los límites permisibles, lo cual afecta la calidad de vida de los residentes. Se concretó que las zonas mayormente impactadas concuerdan con las zonas donde la percepción es más severa. Se proponen medidas de mitigación basadas en experiencias internacionales y se evalúa su aplicabilidad en el contexto costarricense. Las conclusiones buscan crear conciencia sobre la contaminación acústica urbana, y ofrecer insumos técnicos para la mejora de futuras infraestructuras viales en el país.

ABSTRACT

This research assesses the noise impact generated by Phase 1 of the Northern Ring Road project (National Route N39) in San José, Costa Rica, during its operational phase. Growing concerns among nearby residents about increased noise prompted a detailed study that included a mixed methodology of field measurements,

citizen perception analysis, and comparison with current regulations. Two residential areas within the canton of Tibás were selected as study areas. Measurements were taken at different strategic points following technical criteria. A survey was also conducted using a closed questionnaire to measure residents' perceptions of the impact. The results show noise levels that, in some cases, exceed permissible limits, affecting residents' quality of life. It was determined that the most impacted areas are consistent with the areas where the perception is most severe. Mitigation measures based on international experiences are proposed, and their applicability in the Costa Rican context is evaluated. The findings aim to raise awareness about urban noise pollution and provide technical input for improving future road infrastructure in the country.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de infraestructura vial en entornos urbanos densamente poblados presenta grandes beneficios en términos de movilidad y conectividad, pero también conlleva implicaciones ambientales y sociales relevantes que deben ser abordadas. En este contexto, la presente investigación se enfocó en la evaluación del impacto sonoro generado durante la fase operativa de la Etapa 1 del proyecto de Circunvalación Norte (Ruta Nacional N39), en San José, Costa Rica. Esta vía constituye el primer viaducto del país, fue inaugurada en 2024, y forma parte del plan para cerrar el anillo vial que circunda el área central de la capital. Su objetivo se enfocó en mejorar los tiempos de desplazamiento y reducir la congestión vehicular. Sin embargo, desde su apertura, residentes de las comunidades aledañas han reportado un aumento significativo en los niveles de ruido, lo cual ha generado preocupación por sus posibles efectos sobre la salud y la calidad de vida. El proyecto carece de medidas ambientales asociadas al control del ruido.

A nivel internacional, múltiples estudios han demostrado que el tránsito vehicular es una de las principales fuentes de contaminación acústica en las ciudades, responsable de hasta un 70% del ruido ambiental [1]. Las autopistas, en particular, tienden a amplificar estos efectos debido a su diseño estructural y la exposición directa del sonido. La interacción entre neumáticos y pavimento, los motores de los vehículos y otros elementos como las juntas de dilatación contribuyen al aumento del ruido, especialmente en zonas sensibles como las residenciales cercanas [2] [3].

En Costa Rica, el estudio del impacto sonoro de obras viales ha sido limitado, tanto en cantidad como en profundidad. Investigaciones previas han tendido a enfocarse en mediciones puntuales o en la evaluación de estrategias aisladas de mitigación, sin desarrollar análisis integrales que relacionen las condiciones sonoras con el entorno urbano, la percepción de la comunidad y el uso de esta información para un diseño más armonioso de la infraestructura [4] [7]. La carencia de este tipo de estudios al evaluar el impacto vial y ambiental se vuelve crítica cuando las obras se ubican en regiones urbanas como el cantón de Tibás, donde la alta densidad poblacional y la cercanía de viviendas a las obras incrementa la vulnerabilidad de la población ante este tipo de impactos. Aunado con ello, en este caso el diseño del proyecto de Circunvalación Norte no consideró de manera suficiente el componente acústico en su planificación, lo que ha generado la problemática actualmente percibida por los vecinos y aún sin resolver aunque el proyecto lleva casi un año en funcionamiento. A través de un enfoque metodológico que combina trabajo de campo, análisis estadístico, estudios de percepción ciudadana y comparación normativa, se generó una caracterización

integral del fenómeno sonoro asociado al corredor vial, y se propusieron medidas concretas de mitigación ajustadas al contexto costarricense.

Este trabajo no solo busca ampliar el conocimiento técnico sobre el impacto del ruido vehicular en entornos urbanos, sino también aportar a una mejora en la calidad de vida de las comunidades afectadas, fortaleciendo los vínculos entre la investigación académica, la gestión ambiental local y la participación ciudadana en la toma de decisiones sobre el desarrollo urbano.

II. METODOLOGÍA

A. Revisión bibliográfica:

Se realizó una investigación documental exhaustiva sobre normativas nacionales e internacionales, artículos científicos, tesis y estudios previos relacionados con el ruido ambiental generado por infraestructura vial. Esto permitió definir las variables clave a considerar, establecer los fundamentos técnicos del estudio y seleccionar metodologías de referencia para el trabajo de campo y el análisis de los datos tomados.

B. Trabajo de campo: caracterización de la zona, mediciones y sondeo ciudadano:

Se delimitó un Área de Influencia Directa (AID) de 200 metros a cada lado del borde exterior de la vía, siguiendo recomendaciones metodológicas internacionales [4]. El tramo analizado correspondió al segmento comprendido entre la Ruta 32 y la salida hacia León XIII, en el cantón de Tibás, por ser la única sección del viaducto en operación al momento del estudio y por su proximidad a zonas residenciales sensibles. El proyecto completo de circunvalación norte abarca aproximadamente 5.5 kilómetros y se desarrolla en varias etapas.

La caracterización del entorno se realizó mediante visitas de campo, análisis de imágenes satelitales, consulta de capas prediales, de uso de suelo y propuestas de zonificación proporcionadas por la Municipalidad de Tibás. Toda esta información cartográfica fue analizada e integrada mediante el uso de sistemas de información geográfica (QGIS). Con ello, se identificó el uso actual del suelo y áreas críticas para las mediciones, las cuales se corroboraron en campo.

Se definieron 18 puntos de medición distribuidos en dos comunidades residenciales: barrio Dalia (11 puntos) y Cuatro Reinas Séptima Etapa (7 puntos), seleccionados mediante una combinación del método por distancia a la fuente, el método de cuadrícula, criterios de sensibilidad (zonas residenciales organizadas y seguras) y posibilidad de acceso (los puntos se ubicaron en zona pública). Los puntos se distribuyeron en tres categorías según su proximidad a la carretera: zona cercana (10 m), zona media (10–100 m) y zona interna (100–200 m) siguiendo la recomendación de la literatura [5]. Cada punto fue evaluado en tres horarios distintos que combinaron horas de mañana y tarde; durante tres días hábiles diferentes (de lunes a viernes), evitando feriados, fines de semana y horarios pico, esto para garantizar condiciones de tránsito estables. Las mediciones se realizaron con un sonómetro digital BK Precision, calibrado, con respuesta SLOW y ponderación de frecuencia A,

montado en trípode a 1.40 m de altura y orientado hacia la vía. Se respetó una separación mínima de 1.5 m con respecto a edificaciones según se recomienda en la legislación nacional vigente. Cada sesión de monitoreo tuvo una duración de 15 minutos, divididos en intervalos de 10 segundos, de conformidad con fuentes especializadas [5] [6] [7]. Las condiciones meteorológicas fueron monitoreadas para garantizar la ausencia de lluvia, pavimento seco y vientos menores a 17 km/h [8] [9].

Con el fin de complementar los datos técnicos con la percepción ciudadana, se aplicó un sondeo a los habitantes de ambas urbanizaciones, utilizando un formulario estructurado con escala de Likert, y basado en la normativa ISO/TS 15666. El sondeo indagó sobre percepción del ruido, molestias, impactos en salud y sugerencias de mitigación. Se empleó un muestreo por conveniencia hasta alcanzar el punto de saturación, permitiendo una interpretación cualitativa representativa sin necesidad de censo [10].

La encuesta fue difundida mediante visitas presenciales, grupos vecinales en línea y códigos QR, garantizando accesibilidad digital y participación voluntaria y anónima de los interesados. La información fue organizada y codificada para su análisis estadístico, que permitieron identificar patrones de percepción en función del barrio, edad del entrevistado y ubicación.

C. Análisis de resultados, propuesta de mitigación y evaluación económica

Se analizaron estadísticamente los niveles de presión sonora mediante parámetros como L_{eq} , L_{10} , L_{50} y L_{90} , de acuerdo con lineamientos nacionales e internacionales [5] [6]. Los datos fueron representados espacialmente mediante mapas acústicos generados en QGIS usando interpolación IDW [11].

Se compararon los resultados de campo con los límites permitidos en la legislación costarricense vigente y con los valores guía de la OMS para zonas residenciales. También se contrastaron los datos técnicos con las percepciones ciudadanas obtenidas en el sondeo, evaluando coincidencias o divergencias entre el ruido percibido y el ruido medido. Finalmente, se revisaron medidas de mitigación acústica implementadas internacionalmente y se evaluó su aplicabilidad técnica y económica al caso costarricense. Para ello, se realizaron reuniones con actores clave como funcionarios municipales y del MOPT. Se presentan recomendaciones concretas y estimaciones preliminares de costos, considerando la realidad nacional y la experiencia internacional en infraestructura vial.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio se enfocó en medir y analizar el impacto sonoro generado por la operación de la Etapa 1 de la Circunvalación Norte en zonas residenciales cercanas del cantón de Tibás, evaluando tanto datos objetivos (mediciones acústicas) como subjetivos (percepción ciudadana).

A. Resultados del análisis territorial y de las mediciones de campo

Se verificó que los barrios seleccionados (Dalia y Cuatro Reinas Séptima Etapa) se encuentran en una zona predominantemente residencial, con viviendas ubicadas a escasos metros de la vía elevada. Algunas propiedades se sitúan a distancias muy cercanas (de 2 o 5 metros del borde

del viaducto), sin barreras físicas entre la fuente emisora y las viviendas, lo cual eleva la exposición al ruido. Esta cercanía, sumada a la alta densidad urbana, incrementa la vulnerabilidad de los residentes frente al impacto sonoro. Las mediciones se realizaron conforme a protocolos técnicos establecidos y se demostró que varios puntos excedieron los límites de ruido establecidos por el Reglamento para el Control de Ruido Ambiental en Costa Rica para zonas residenciales en horario diurno: 65 dB(A) (Ver figura 1). En particular, los puntos más cercanos a la carretera registraron niveles de presión sonora equivalentes (L_{eq}) elevados, con picos de hasta 75–80 dB(A).

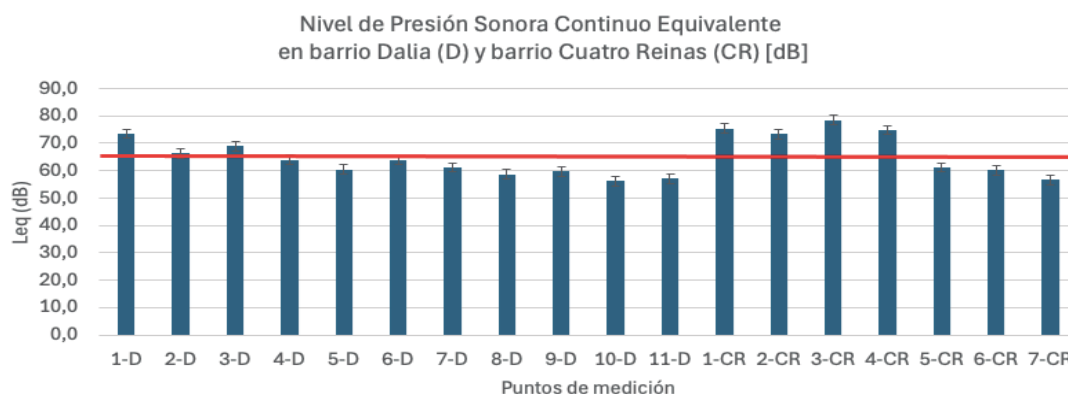


Fig. 1. Nivel de presión sonora de Barrio Dalia. y Barrio Cuatro Reinas.

Los percentiles acústicos analizados reflejaron un ambiente ruidoso constante, con niveles L_{10} altos, indicativos de eventos sonoros frecuentes de alta intensidad, y niveles L_{90} también elevados, lo cual evidencia un alto ruido de fondo.

Los mapas de ruido fueron generados en QGIS mediante interpolación IDW (Figura 2) y permitieron visualizar espacialmente la distribución del impacto sonoro, destacando concentraciones de mayor exposición en sectores con viviendas más cercanas y sin vegetación ni estructuras que actúen como atenuantes. Esta visualización también evidenció la gradual disminución del ruido con la distancia, validando el criterio técnico de la delimitación del Área de Influencia Directa.

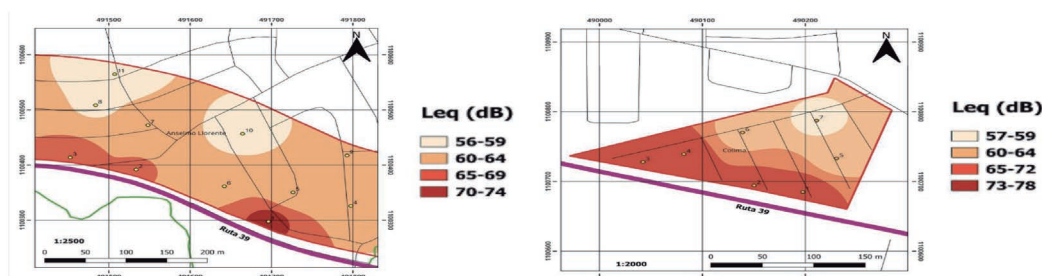


Fig. 2 Mapas de isonoras para las zonas de estudio.

B. Resultados del sondeo ciudadano

La muestra alcanzada fue de 87 vecinos entre ambos barrios. Se evidenció una percepción generalizada de molestia por parte de los residentes, particularmente en aquellos puntos donde las mediciones registraron niveles superiores a los normativos. Más del 70% de los participantes manifestaron estar “de acuerdo” o “muy de acuerdo” con que el ruido ha aumentado desde la apertura del tramo, y un porcentaje significativo (73,5%) señaló afectaciones en el sueño, estrés y concentración.

Aunque en algunas zonas los niveles medidos no superaban los límites legales, la percepción de molestia persistía, lo que sugiere que incluso valores dentro de la normativa pueden resultar problemáticos para la calidad de vida cuando la exposición es continua. Este hallazgo destaca la importancia de complementar las mediciones objetivas con análisis cualitativos en la evaluación de impactos ambientales.

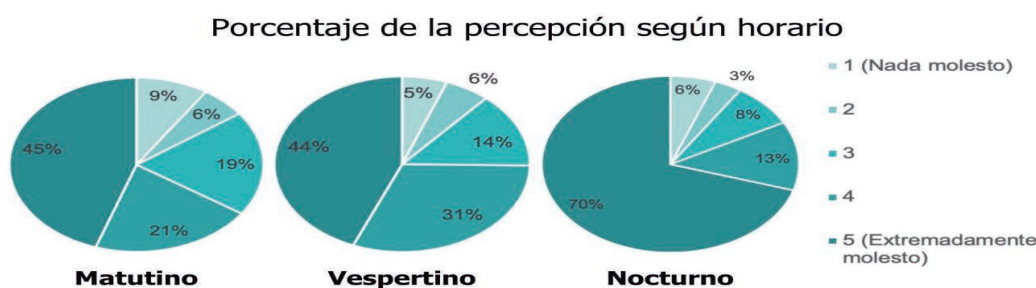


Fig. 3 Percepción de ruido en el interior de las casas según horario.

C. Análisis integral

La comparación entre los datos acústicos y las respuestas del sondeo revela una correlación asociada a que entre mayor nivel de ruido medido y mayor grado de molestia percibida. Sin embargo, también se identificaron zonas donde, a pesar de que los valores medidos no excedían la norma, los residentes reportaron molestias, lo que resalta la influencia de factores adicionales como la sensibilidad personal, horarios de mayor exposición, o condiciones estructurales de las viviendas (por ejemplo, materiales poco aislantes), entre otras variables que no fueron medidas directamente en este estudio.

Estos resultados evidencian la necesidad de revisar y contextualizar los límites normativos actuales, considerar estrategias de mitigación específicas según el tipo de infraestructura y promover una planificación vial más integral que contemple el componente acústico desde la etapa de diseño. Se identificaron zonas críticas que requieren la colocación de barreras acústicas.

CONCLUSIONES

El estudio realizado permitió confirmar que la operación de la Etapa 1 de la Circunvalación Norte ha generado un impacto sonoro significativo en las comunidades residenciales cercanas. Las

mediciones acústicas evidenciaron que, en varios puntos evaluados, los niveles de presión sonora superan los límites establecidos por la normativa nacional vigente para zonas residenciales durante el horario diurno, alcanzando valores que comprometen el confort acústico y la salud de los residentes.

Asimismo, la percepción ciudadana reflejó un alto grado de molestia por parte de la población, incluso en sectores donde los niveles de ruido no excedían los parámetros normativos. Esto indica que los efectos del ruido vial no solo se deben evaluar desde un enfoque técnico, sino también social, considerando las particularidades del entorno, la sensibilidad individual y las características de las edificaciones.

La combinación de metodologías cualitativas y cuantitativas permitió validar la hipótesis de que el proyecto vial no contempló de forma adecuada los posibles efectos sonoros durante su etapa de diseño, lo que ha derivado en una exposición directa y constante al ruido en zonas habitadas. Ante ello, se hace evidente la necesidad de incorporar criterios acústicos desde las fases iniciales de planificación de infraestructura vial, especialmente en entornos urbanos densamente poblados.

Finalmente, el estudio propone una serie de recomendaciones técnicas para mitigar el impacto identificado, entre ellas la instalación de barreras acústicas, el uso de pavimentos fonoabsorbentes y la incorporación de zonas verdes amortiguadoras. Estas medidas, deben evaluarse en conjunto con las instituciones responsables, como el MOPT y las municipalidades, para asegurar su viabilidad y sostenibilidad. La investigación también abre la puerta a futuros estudios que profundicen en el análisis de largo plazo del ruido vehicular en el país y su gestión normativa, técnica y comunitaria.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Municipalidad de Tibás, al Laboratorio de Ingeniería Ambiental y a los vecinos.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio del Medio Ambiente de Chile, “Ruido ambiental,” s.f. [En línea]. Disponible en: <https://ruido.mma.gob.cl/temas/#:~:text=Numerosos%20estudios%20afirman%20que%20el,ruido%20ambiental%20en%20una%20ciudad>
- [2] J. Morales, *Estudio de la influencia de determinadas variables en el ruido urbano producido por el tráfico de vehículos*, Tesis doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, UPM, 2009. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.2487>
- [3] M. Khaleghi y J. Pakzad, “Elevated highways in residential layouts: The imposed negative impacts (case study: Sadr Elevated Highway),” *International Journal of Architecture and Urban Development*, vol. 7, no. 2, pp. 5–18, 2017.
- [4] N. Cruz y A. Rojas, “Evaluación del impacto sonoro del tren urbano y sus implicaciones sociales: análisis del tramo San José–Tres Ríos,” *Revista Tecnología en Marcha*, 2024.
- [5] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “Reglamento que establece requisitos sobre la medición de niveles de sustancias y energía en el medio ambiente por parte de los gestores de carreteras, ferrocarriles, tranvías, aeropuertos o puertos,” *FAOLEX*, 16 de junio de 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC113813>

- [6] Poder Ejecutivo, *Reglamento para el Control de la Contaminación por Ruido: N° 39428-S*, Costa Rica, 2016.
- [7] J. A. Sandoval, *Evaluación del impacto de Índice de Regularidad Internacional (IRI) sobre las emisiones de dióxido de carbono, niveles de ruido y material particulado producidos por el tránsito vehicular en carreteras en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*, Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2020.
- [8] A. G. Segura, *Análisis del ruido producido por el paso de vehículos en carreteras de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica*, Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2022.
- [9] Alcaldía Mayor de Bogotá, *Resolución 1632 de 2027*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70207#1>
- [10] J. Casal y E. Mateu, “Tipos de muestreo,” *Revista de Epidemiología y Medicina Preventiva*, vol. 1, no. 1, pp. 3–7, 2003.
- [11] V. Leitón y M. Solórzano, *Propuesta de plan de monitoreo y control de ruido para el casco central del cantón de Heredia, Heredia, Costa Rica, en el periodo 2021-2022*, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica, 2023.

Mejorando el acceso peatonal al Parque Metropolitano La Sabana a través de intervenciones a la infraestructura vial

Improving Pedestrian Access to La Sabana Metropolitan Park through Road Infrastructure Interventions

Daniel Ovares Arroyo

Estudiante, UCR

e-mail: daniel.ovaresarroyo@ucr.ac.cr

Jonathan Agüero Valverde,

Docente, UCR

e-mail: jonathan.aguero@ucr.ac.cr

Diana Jiménez Romero

Docente, UCR

e-mail: diana.jimenez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

INFRAESTRUCTURA PEATONAL, movilidad activa, pacificación vial, planificación urbana, seguridad vial.

Keywords:

ACTIVE MOBILITY, pedestrian infrastructure, road safety, traffic calming, urban planning.

RESUMEN

Ante la insostenibilidad del modelo de transporte centrado en el automóvil, se vuelve urgente rediseñar las ciudades priorizando al peatón. La academia debe liderar este cambio, promoviendo entornos urbanos más seguros, inclusivos y sostenibles. Este proyecto se basó en observación directa, análisis de bases de datos públicas y revisión de normativas e infraestructura utilizadas en la pacificación vial en Norteamérica y Europa. Se realizaron aforos vehiculares y peatonales en cinco intersecciones clave durante tres franjas horarias de alta demanda. Los estudios permitieron identificar comportamientos viales y conflictos derivados de una infraestructura deficiente. Los resultados evidencian que la falta de espacios adecuados obliga a los peatones a circular por trayectorias riesgosas, elevando la probabilidad de accidentes. Asimismo, la ausencia de cruces definidos dispersa el flujo peatonal, dificultando su anticipación. Las propuestas planteadas canalizan el tránsito peatonal mediante ajustes geométricos, mejorando la seguridad sin afectar de forma significativa el flujo vehicular.

ABSTRACT

Given the unsustainability of car-centered transportation models, there is an urgent need to redesign cities to prioritize pedestrians. Academia must lead this transformation by promoting safer, more inclusive, and

sustainable urban environments. This project was based on direct observation, analysis of public databases, and a review of policies and infrastructure used in traffic-calming projects in North America and Europe. Vehicle and pedestrian counts were conducted at five key intersections during three high-demand time periods. These studies helped identify user behavior and conflicts resulting from inadequate infrastructure. Findings show that the lack of appropriate pedestrian spaces forces people to take risky paths, increasing the likelihood of accidents. Additionally, the absence of defined crossings scatters pedestrian flow, making it harder for drivers to anticipate movements. The proposed interventions address these deficiencies through geometric adjustments that channel pedestrian traffic along clearly defined and safe routes, reinforcing their priority right to street space without significantly impacting vehicle flow.

I. INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo, los parques metropolitanos desempeñan un papel fundamental en la calidad de la vida urbana, ya que ofrecen espacios verdes accesibles para la recreación, el deporte, la cultura y el descanso. Estos sitios reúnen distintos tipos de infraestructura recreativa que funcionan como agentes atractores y generadores de viajes. En el caso costarricense, el Parque Metropolitano La Sabana (c.c. “La Sabana”) no es una excepción en este comportamiento. Edificios de gran importancia cultural como el Museo de Arte Costarricense y el Estadio Nacional o infraestructura deportiva como la pista de atletismo aficionado y la Piscina María del Milagro París, se encuentran al interior de la isla verde que representa el parque en la actualidad, en medio de calles de alto tránsito. Según [1] más del 50% de los viajes con destino a La Sabana se realizan mediante medios de movilidad activa y transporte público, sin embargo, la infraestructura del transporte a los alrededores del parque no responde a las necesidades de los usuarios más vulnerables de las vías, concediendo a los vehículos una aplastante prioridad sobre los peatones.

La problemática se evidencia al consultar los registros de accidentes de tránsito brindados por [2], los cuales reportan un total de 61 atropellos en las vías perimetrales a La Sabana en los últimos cinco años registrados (2018-2022), con 20 incidentes sólo en el año 2020, lo que equivale a una persona atropellada cada 18 días. Cabe destacar que estas cifras no contemplan los numerosos conflictos diarios entre peatones y vehículos que no son reportados oficialmente. Bajo este contexto, se reafirma la necesidad de una intervención integral en la infraestructura peatonal circundante que garantice condiciones de seguridad vial adecuadas para los usuarios vulnerables y fomente una movilidad peatonal segura, continua y eficiente.

Este artículo se deriva del proyecto final de graduación [3] en el cual se analizó la movilidad alrededor del parque y se diseñaron cinco propuestas de intervención en sitios críticos con el objetivo de priorizar el acceso peatonal, incrementar la seguridad de estos usuarios y reducir la accidentabilidad en la zona de estudio.

II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este estudio se compone de tres fases principales detalladas más adelante. El enfoque combina la toma de datos y observación en campo, el análisis de datos estadísticos y el modelado computacional, con el fin de diagnosticar las problemáticas relacionadas

con la movilidad peatonal que afronta el área de estudio y proponer mejoras efectivas dentro del entorno urbano analizado.

A. Identificación de los puntos críticos

Se recopiló información de fuentes oficiales y observaciones de campo realizadas en distintos momentos del día, tanto entre semana como en fin de semana, registrando el comportamiento peatonal y vehicular en los alrededores del parque, datos sobre accidentabilidad, tránsito promedio diario, rutas peatonales frecuentes, puntos de cruce habituales y presencia de agentes atractores y generadores de viajes. Se inspeccionó la infraestructura existente, considerando anchos de vía, presencia de aceras, estado y existencia de cruces peatonales y velocidades vehiculares. La superposición de datos permitió identificar 11 sitios clave, determinados por la coincidencia de atropellos en los últimos cinco años, altos volúmenes de tránsito vehicular y afluencia de líneas de deseo peatonal. Los sitios fueron clasificados según su configuración geométrica y los conflictos observados, generando cinco categorías de las cuales fue seleccionado el sitio más representativo como caso de estudio principal.

B. Recolección de información

Siendo definido cada caso de estudio, se recolectaron datos necesarios para elaborar un diagnóstico funcional y evaluar el impacto de posibles intervenciones. Se realizaron levantamientos geométricos a partir de capturas aéreas mediante el uso del dron *DJI Air 2s*. Se obtuvieron también los tiempos de ciclos semafóricos actuales, verificados posteriormente mediante la certificación del Departamento de Semáforos de la DGIT. Adicionalmente, se ejecutaron aforos vehiculares y peatonales utilizando cámaras *CountCAM2* durante las tres franjas horarias de mayor demanda en un día típico entre semana (6:00 a 9:00, 11:00 a 14:00 y 15:30 a 18:30), permitiendo estimar la demanda vehicular y calibrar modelos en el software *Synchro 11*.

C. Propuesta de intervención y análisis de casos

Se evaluó la infraestructura actual, identificando oportunidades de mejora mediante técnicas de pacificación vial y dispositivos de control de tránsito, referenciando normativas nacionales e internacionales, como [4], [5] y [6]. Con los métodos seleccionados, se modeló la situación intervenida y se comparó con la condición actual, evaluando la variación en la demora y el nivel de servicio. En casos donde la propuesta generó una afectación vehicular significativa, se realizaron los ajustes necesarios para mitigar el impacto sin comprometer la mejora en la movilidad peatonal.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este documento discutirá solo uno de los cinco sitios de estudios de [3] denominado para fines prácticos como León Cortés. El sitio corresponde a la intersección entre la Interamericana Norte (RN01), la Interamericana Sur (RN02) y Calle 42 o Autopista Próspero Fernández (RN27).

A. Diagnóstico funcional

El sitio León Cortés (Fig.1) carece de infraestructura y señalización para cruces peatonales seguros, lo que genera desvíos de entre 400 y 800 metros para aquellos peatones que valoren más la seguridad que la longitud de su recorrido. El sitio es regulado mediante un sistema semafórico de dos secuencias: 1) entre las 6:00 y 8:30 el flujo vehicular en sentido este – oeste es suprimido a causa de la existencia de un carril reversible, permitiendo que el sistema trabaje alternando los movimientos norte-este y sur – norte manteniendo libre el movimiento directo norte – sur; 2) durante el resto del día, la inserción del movimiento este – sur desde la Ruta Nacional 02, genera ciclos de tres fases. Esta segunda secuencia detiene el tránsito del acceso norte por 18 a 23 segundos, espacio aprovechado por los peatones para realizar el cruce latitudinal de 18 metros de largo, para el cual el tiempo de detención resulta suficiente al considerar una velocidad de paso de 1 m/s. Lamentablemente esta situación no se repite entre las 6:00 y 8:30, ya que el flujo no es detenido completamente en ningún acceso. Esto provoca cruces peatonales dispersos y riesgosos como los indicados en la Fig. 1, con frecuencia entre vehículos en movimiento y utilizando como refugio los espacios entre vehículos detenidos por alguna de las fases del semáforo.



Fig. 1. Levantamiento geométrico del sitio León Cortés, líneas de deseo peatonal y atropellos registrados.

Los conteos realizados identifican el movimiento norte-sur como dominante. Aunque no se observan maniobras ilegales frecuentes, se ha detectado el uso del carril exclusivo para giro izquierdo en la ejecución del movimiento directo, atribuible a la discrepancia entre los dos carriles destinados a la maniobra en el acceso norte y los tres de recepción en el acceso sur. El nivel de servicio (LOS) varía entre periodos, manteniendo niveles de entre B y F para cada movimiento. El acceso

este corresponde al más crítico, con LOS F y demoras de hasta 150 segundos por vehículo durante la hora pico vespertina.

B. Propuesta de intervención y evaluación

Se propone aprovechar las fases semafóricas existentes para incluir cruces peatonales seguros y controlados. Realizar esta intervención en el acceso norte no representa mayor problema durante los periodos del medio día y tarde, sin embargo, durante la hora pico matutina implica detenciones totales del tráfico, lo que deteriora el nivel de servicio. Los flujos peatonales generados por el Liceo Luis Dobles Segreda no permiten prescindir de las medidas durante este periodo, por lo que se plantea su colocación sobre el acceso sur. Al aplicar una dieta de carril [5] se logra reducir la afectación al tránsito vehicular al establecer un cruce en dos fases. Este abordaje también permite eliminar la discrepancia entre carriles al construir una isla de refugio peatonal sobre el carril de recepción sobrante. De esta manera se conservan dos de los tres carriles existentes y una mediana central de 2,5 metros de ancho, con retiros de 0,3 metros para reducir la fricción. Esta medida permite acortar la longitud de cruce a la mitad de la longitud actual, acción que mejora la experiencia de los usuarios a pie en cuanto a seguridad y comodidad. De manera complementaria, la línea de parada del acceso sur se traslada 9.0 metros hacia el sur, incorporando un alto con prioridad peatonal sobre el carril exclusivo de giro derecho y un paso de cebra demarcado en la calzada, esta configuración permite a los vehículos girando a la derecha continuar su trayectoria siempre que el flujo peatonal lo permita. La sección P3 del cruce a dos fases se sincroniza con el ciclo actual del semáforo, mientras que la sección P4 interrumpe el flujo norte-sur durante 10 segundos al inicio de cada ciclo.

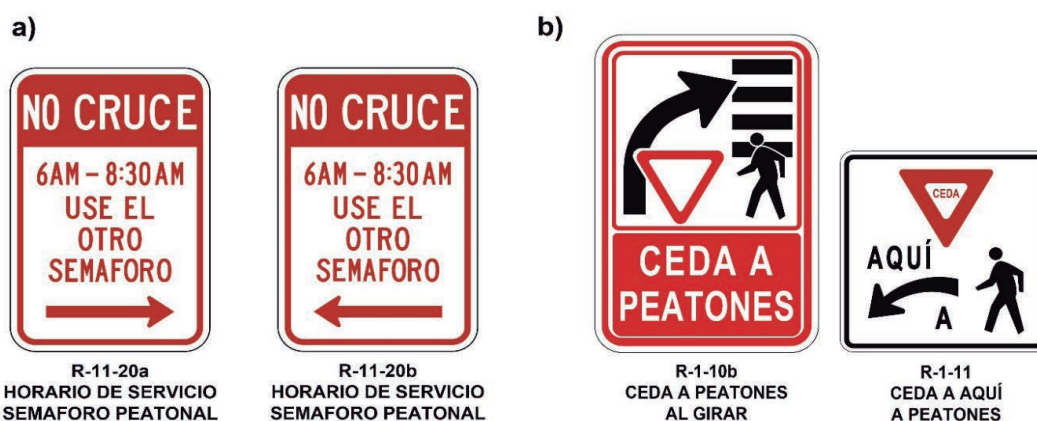


Fig. 2. Señalización propuesta.

El cruce peatonal en el acceso sur atiende la necesidad de conexión latitudinal; no obstante, dadas las condiciones que ofrecen los ciclos de la segunda secuencia del sistema semafórico, se considera oportuno incorporar formalmente el cruce norte. Debido a que su activación permanente

afectaría negativamente el nivel de servicio durante la hora pico matutina, se propone habilitar esta fase únicamente fuera de la franja horaria entre 6:00 y 8:30, utilizando la señalización indicada en la Fig. 2a para facilitar su comprensión por parte de los usuarios. Para el cruce peatonal meridional se propone convertir la isla de canalización existente al noreste de la intersección en una isla de refugio peatonal conectada a la acera mediante un paso peatonal elevado [5] sobre la rampa del movimiento este-norte, la cual es acompañada con una señal de Alto Prioridad Peatones y su respectiva línea de parada. A partir de la isla de refugio peatonal generada se implementa el cruce P2 en simultáneo con el flujo vehicular sur-norte, aprovechando los 24 segundos en los que permanecen detenidos los movimientos norte-este y este-sur. Con el fin de advertir el conflicto entre este nuevo cruce peatonal y el flujo vehicular de giro derecho sur-este, se propone ubicar antes del giro la señal R-1-10b, la cual sería reforzada sobre la línea de parada existente con la señal R-1-11, ambas mostradas en la Fig. 2b, esta configuración permite a los vehículos provenientes del sur atravesar la zona de seguridad siempre y cuando el flujo de peatones lo permita. La planta general de esta propuesta y su señalización correspondiente se presenta en la Fig. 3.

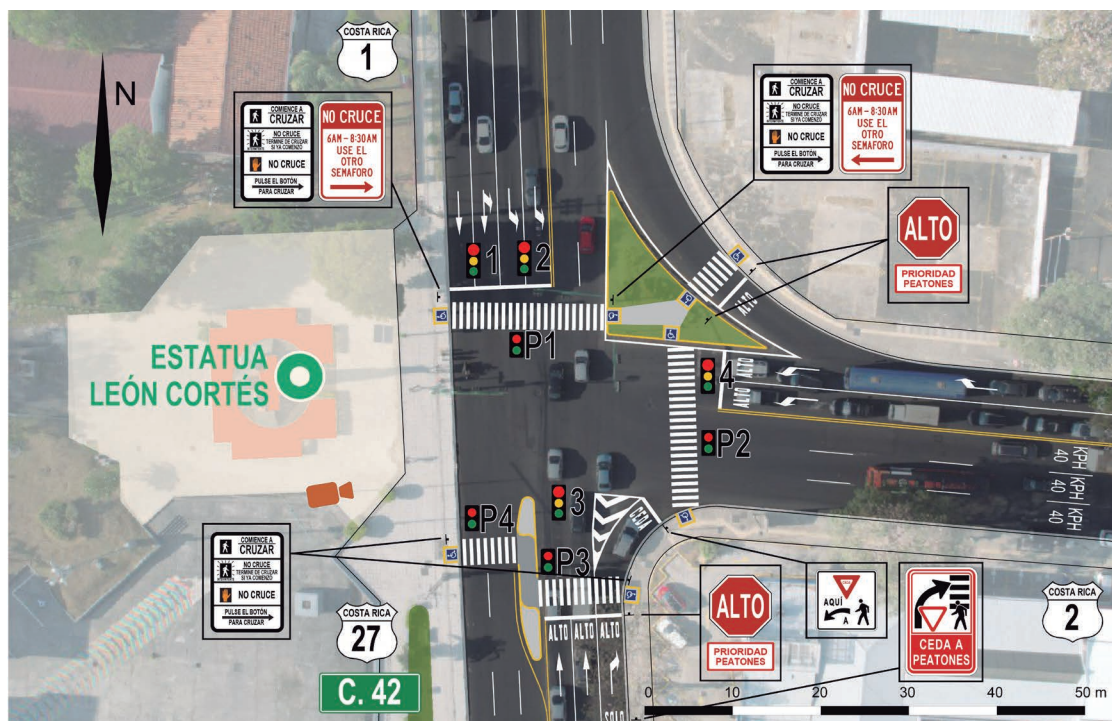


Fig. 3. Propuesta de intervención geométrica y señalización.

Aunque podría asumirse que la propuesta afecta únicamente al movimiento norte-sur, la presencia de un carril compartido con el giro izquierdo también impacta al movimiento norte-este. La implementación de fases peatonales genera un aumento en la demora de ambos movimientos; sin embargo, el único cambio en el nivel de servicio se registra durante la hora pico del mediodía en el movimiento norte-este, pasando de 19,7 a 20,7 segundos y en el movimiento norte-sur, con un

incremento de 19,3 a 24,1 segundos. Estos efectos negativos sobre el flujo vehicular son insignificantes en comparación con la mejora sustancial en las condiciones de seguridad peatonal, por lo que las intervenciones se consideran adecuadas para el sitio analizado.

CONCLUSIÓN

El análisis expone una marcada deficiencia en el contexto costarricense en cuanto a la provisión de infraestructura orientada al tránsito peatonal eficiente y seguro, manifestándose en la inexistencia de cruces seguros en intersecciones de constante flujo peatonal y alto volumen vehicular. Como consecuencia, los usuarios se ven obligados al uso de trayectorias arriesgadas donde la integridad física es amenazada con frecuencia. A partir de las evaluaciones realizadas y la simulación de escenarios intervenidos se comprueba la factibilidad de la implementación de medidas dirigidas a la mejora de la experiencia peatonal, sin comprometer significativamente el desempeño vehicular. En este sentido, se concluye que es urgente replantear las estrategias de planificación urbana en favor de un modelo de movilidad sostenible, donde la infraestructura peatonal ocupe un papel prioritario en la configuración del espacio urbano.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Jonathan Agüero Valverde, director del proyecto de graduación que sirvió como base para la redacción de este artículo, a la Ing. Diana Jiménez Romero y al Ing. Javier Zamora Rodríguez, ambos asesores del proyecto, quienes colaboraron con su conocimiento y años de experiencia para hacer de esta iniciativa un primer boceto del proyecto para una ciudad más amigable con el peatón.

REFERENCIAS

- [1] Fundación Centro Para la Sostenibilidad Urbana. “Diagnóstico participativo: Oportunidades de Mejora para el Parque Metropolitano la Sabana”, San José, Costa Rica, 2023.
- [2] Observatorio Costarricense de Seguridad Vial. “Visor Cartográfico” mapas.csv.go.cr (acceso en agosto 20, 2024).
- [3] D. Ovares, “Propuesta de intervención de la infraestructura vial adyacente al Parque Metropolitano La Sabana como medida de mejora para acceso peatonal y reducción de la accidentabilidad” Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2025.
- [4] Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), “Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito”. Centro de recursos SIECA. <https://www.sieca.int/producto/acuerdo-centroamericano-sobre-senales-viales-uniforme/> (accesado en May. 17, 2024).
- [5] Federal Highway Administration, “Traffic Calming ePrimer”. FHWA Highway Safety Programs. <https://highways.dot.gov/safety/speed-management/traffic-calming-eprimer> (accesado en nov. 23, 2024).
- [6] Federal Highway Administration “Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways”. 11th Edition of the MUTCD. December 2023 https://mutcd.fhwa.dot.gov/kno_11th_Edition.htm (accesado en mar. 03, 2025).

Monitoreo/ Investigación/Diseño

Registros de aceleración del 2019-2025

Acceleration records from 2019-2025

Aarón Moya

Investigador, Laboratorio de Ingeniería Sísmica, INII-UCR

e-mail: cesar.moya@ucr.ac.cr1

Palabras clave:

Aceleración máxima, intensidad sísmica, movimiento fuerte, terremoto.

Keywords:

Earthquake, peak ground acceleration, seismic intensity, strong motion.

RESUMEN

Se presentan los datos de aceleración de los eventos sísmicos registrados por la red de acelerógrafos del Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica (LISUCR) durante los últimos cinco años (abril del 2019 a marzo del 2025). El propósito es brindar un resumen de los principales parámetros que caracterizan el movimiento fuerte del suelo como lo son la aceleración y velocidad máxima del suelo así como la intensidad sísmica durante los últimos cinco años de operación del actual sistema de registro. La información proviene únicamente de los equipos ubicados en estructuras de un solo piso, lo que se conoce como campo libre.

ABSTRACT

Acceleration data for the most significant seismic events recorded by the Earthquake Engineering Laboratory's accelerograph network from April 2019 to March 2025 are presented. The purpose is to provide a summary of the main strong ground motion parameters of particular interest in civil engineering, such as acceleration and velocity ground motion, as well as seismic intensity. The information comes only from equipment located in single-story structures, known as free-field.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del movimiento fuerte del suelo, producto de un evento sísmico, constituye una herramienta fundamental para la mitigación del daño y el diseño sismorresistente de infraestructuras. Cuando se analiza una cantidad de datos en el tiempo, se pueden visualizar ciertos patrones que ayudan a identificar zonas vulnerables o de comportamientos particulares ante el paso de las ondas. Este informe se centra en tres de los parámetros más representativos que se obtienen de la lectura de los aceleorgramas como lo son la aceleración y velocidad máxima del suelo (PGA y PGV por sus siglas en inglés respectivamente) y la intensidad sísmica.

El PGA es un indicador directo de la fuerza del sismo y que está influenciado por las frecuencias altas. Este se expresa en gales (cm/s^2) y se utiliza principalmente en códigos de diseño sísmico y mapas de amenaza. El PGV, por su parte, se mide en cm/s y es más sensible a frecuencias medias y bajas por lo que correlaciona con estructuras flexibles como puentes y suelos blandos entre otros. La intensidad sísmica, que en este informe se usa la desarrollada por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) [1], permite una evaluación cualitativa del impacto de un terremoto sobre las personas, edificaciones y el entorno. La ventaja que representa la JMA sobre la comunmente usada Intensidad Modificada de Mercalli (IMM), es que el cálculo se puede hacer desde los valores de los acelerógrafos con lo cual se obtiene una medida más directa. La JMA varía de 0 a 7, siendo los valores de 5-, 5+, 6-, 6+ y 7 asociados con movimiento fuerte a muy fuerte.

Aquí se resumen los datos del 01 de abril del 2019 al 30 de marzo del 2025. La información acelerográfica puede usarse para complementar estudios de gestión del riesgo sísmico, actualizar normativas técnicas como el Código Sísmico y en el largo plazo llegar a fortalecer las políticas de prevención y planificación urbana.

II. RED ACELEROGRAFICA

El LISUCR cuenta con una red de movimiento fuerte compuesta por un total de 166 acelerógrafos digitales al 2025. Están diseñados para registrar movimientos fuertes en un amplio rango dinámico sin llegar a saturarse. La mayoría son equipos triaxiales de 24 bits con sensores de fuerza balanceada (FBA en inglés) que se caracterizan por ser de alta fidelidad, bajo ruido y amplia respuesta lineal. Otro conjunto de acelerógrafos poseen sensores de sistemas microelectrónicos (MEMS en inglés) cuya ventaja es ser de bajo costo, tamaño reducido y facilidad de integración para la densificación de la red. Cada equipo envía su información de manera remota a un servidor central donde se procesan y analizan los datos.

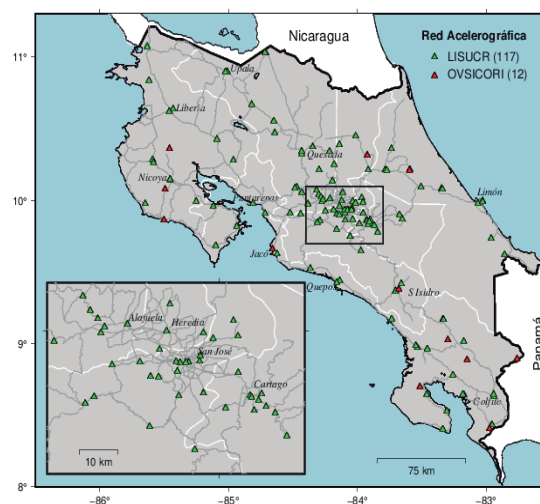


Fig. 1. Distribución de la red acelerográfica del LISUCR correspondiente al año 2025. Los equipos que se comparten con el OVSICORI se muestran en color rojo.

Los acelerógrafos están distribuidos en 117 estaciones de campo libre, 13 edificios y 3 pozos. En los edificios, el número de equipos es variable. Un edificio alto como Torres del Paseo Colón posee cinco equipos mientras que uno bajo como el Hospital Calderón Guardia solo dos. En cuanto a los pozos, estos poseen un equipo en superficie y otro a profundidad. Ellos se ubican en sedes de la Universidad en Jardín Botánico Lankester (profundidad 30 m), Finca Fabio Badrit (profundidad 40 m) y Finca Fraijanes (profundidad 24 m).

La mayoría de las estaciones se ubican en la Gran Área Metropolitana (GAM) y a lo largo de la costa Pacífica donde los estudios de amenaza dan una mayor probabilidad de ocurrencia de movimientos fuertes [2]. La red se ve enriquecida con la inclusión de 12 estaciones acelerográficas pertenecientes al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA). El menor número de equipos se ubica hacia el este del país, donde históricamente la sismicidad ha sido baja, sin dejar de lado que en 1991 el un terremoto de magnitud 7,7 azotó la región del Caribe [3] [4].

III. MARCO TECTONICO Y SISMICIDAD

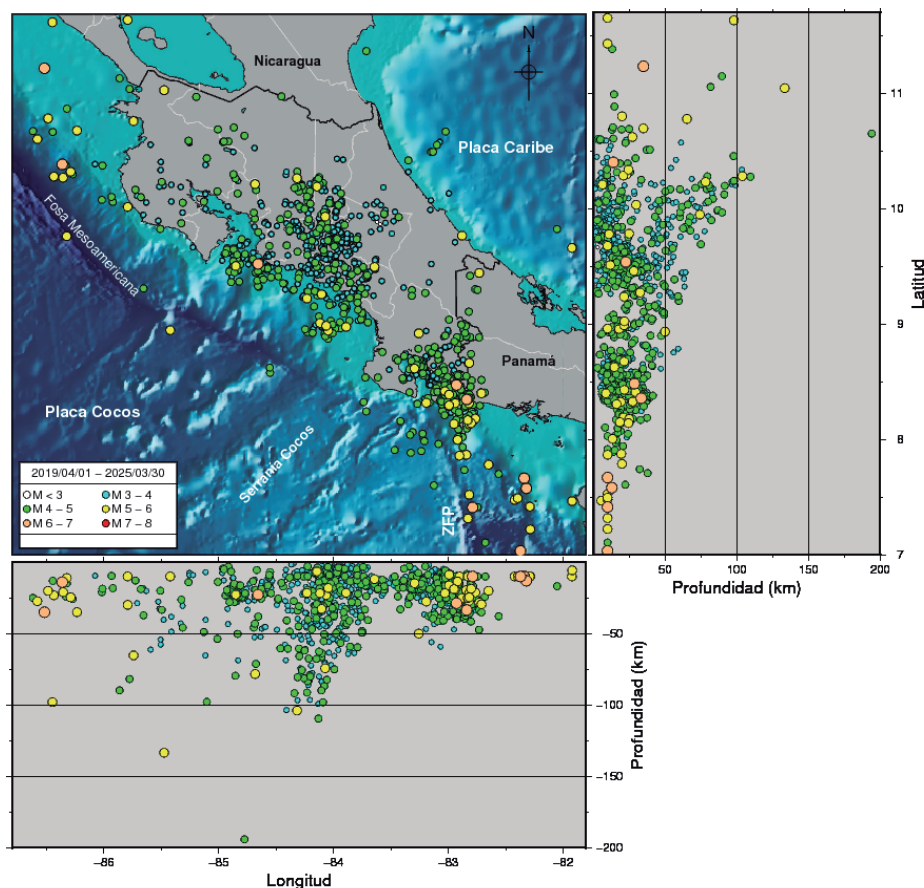


Fig. 2. Eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica del 1 de abril del 2019 al 30 de marzo del 2025. Claramente la sismicidad se concentró en la zona central y sur del país, siendo más escasa en el Pacífico Norte y el Caribe.

La principal fuente generadora de sismos en Costa Rica es el proceso de subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe a lo largo de la Fosa Mesoamericana (Fig. 2). Terremotos como el de Golfito en abril de 1983 [5], Cóbano en marzo de 1990 [6], Dominical en 1999 [7] y Nicoya en 2012 [8] [9] son solo algunos ejemplos. Otra importante fuente de sismicidad es la producida por el fallamiento local que afectan directamente los centros de población por su cercanía. El evento más representativo por su nivel de destrucción y número de víctimas mortales fue el de Cartago de 1910 [10]. En 1990 el terremoto de Alajuela causó graves daños a esa ciudad, aunque su epicentro se localizó a varios kilómetros de distancia [11] [12] y más recientemente el del 2009 en Cinchona [13] que también causó muerte y destrucción en la región de Cariblanco.

Hasta el 2025, los eventos sísmicos que el LISUCR registraba eran aquellos que sobrepasaban un umbral de cambio de amplitud predefinido en una de las trazas en más de siete estaciones. Así, durante el período comprendido entre el 1 de abril del 2019 y el 30 de marzo del 2025, se registraron un total de 1132 sismos (Fig. 2). De ese total, solo aquellos cuya aceleración máxima en cualquiera de las tres componentes excede los 2 gales son guardados en el formato LIS [14] lo que resulta en 4362 registros, poco más de 800 registros por año.

El mayor rango de magnitudes registradas fue de M3,0 - M4,0 con 582 eventos seguido de 399 entre magnitud M4,0 - M5,0 (Fig. 3). Hubo 15 eventos de magnitud mayor a M6,0. La mayoría de ellos están asociados a la Zona de Fractura de Panamá al sur del país (Fig. 2). Un segundo grupo ocurrió en el Pacífico Norte y frente a las costas de Nicaragua (Fig. 2). Solamente un sismo de magnitud M6,0 ocurrió en el Pacífico Central, específicamente frente a las costas de Jacó el 24 de agosto del 2020.

El evento con mayor aceleración se registró en la estación de PIRO en la Península de Osa debido al sismo del 07 de marzo del 2020 de magnitud de 5,4 a una profundidad de 50 km en la Zona Sur. La aceleración máxima registrada fue de 610,6 gales aunque la estación se ubicaba a 77 km del hipocentro (Fig. 4.). En Buenos Aires, en cambio, a 56 km del hipocentro, el máximo fue de 211 gales.

Hubo tres eventos con magnitud máxima de M6,7, pero solo uno de ellos, el del 21 de julio del 2021 fue registrado ampliamente por la red acelerográfica. La Fig. 5 muestra la duración del movimiento sísmico en cada estación. En el Caribe principalmente, los movimientos de eventos lejanos, como éste, tienden a durar tanto como en la Zona Sur que está mucho más cerca del epicentro.

Un total de 11 registros tuvieron aceleraciones superiores a los 200 gales, que se puede catalogar como movimiento fuerte (Fig. 3). En el gráfico de aceleración máxima vs distancia de la Fig. 3 se incluyen solo los eventos de magnitudes mayores a M5,0 con el fin de mostrar más claramente la dependencia de la aceleración con la distancia. Se muestran los valores máximos por evento y no por registro.

IV. VELOCIDAD MAXIMA E INTENSIDADES

Los registros de aceleración se integraron para calcular la velocidad máxima (PGV). En la Fig. 6 se muestran los valores de PGV y magnitud para los eventos ocurridos desde 1990 al presente. Cada cuadro blanco representa el máximo de cada estación por evento. Los tres puntos de PGV superior a

41 cm/s (movimiento severo) corresponden al registro en Puntarenas por el terremoto de Cóbano de 1990 ($M7,0$), en Parrita por el terremoto de noviembre del 2017 ($M6,5$) y Alajuela por el terremoto de diciembre de 1990 ($M_s 5,7$). El máximo valor de PGV de los sismos analizados en este estudio fue de 35,6 cm/s en la estación de Finca Naranjo por un sismo ocurrido del lado panameño el 26 de junio del 2019 ($M6,4$). Un total de 26 registros superaron los 10 cm/s, de estos 23 fueron de estaciones ubicadas en la Zona Sur, particularmente las estaciones de Finca Naranjo, Laurel de Corredores y Ciudad Neily. Los otros tres sitios fueron El Angel cerca de Cariblanco de Sarapiquí, Nosara y Talamanca.

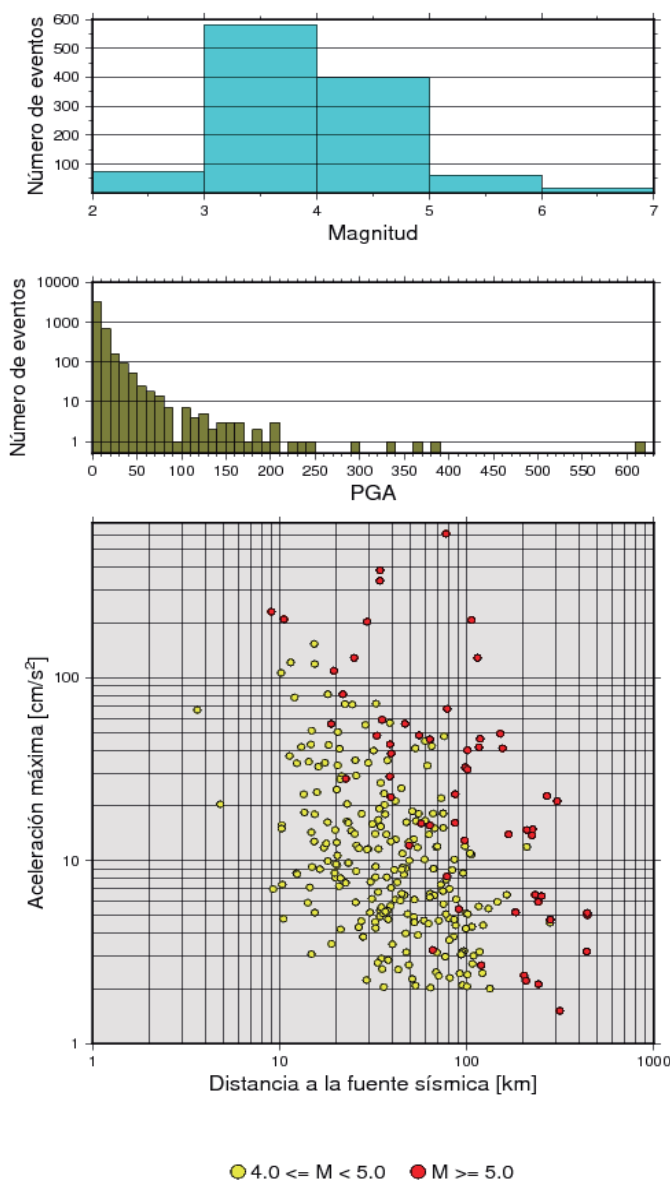


Fig. 3. Arriba: Histograma del número de eventos registrados vs magnitud y PGA. Abajo: Distribución de los eventos en función de la distancia hipocentral según magnitud.

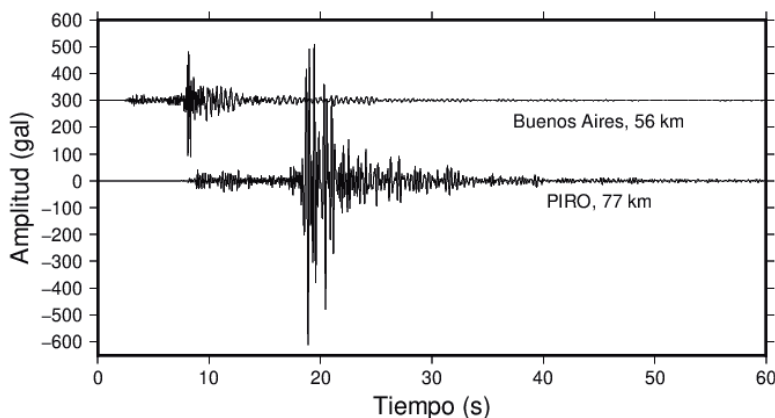


Fig. 4. Registro de PIRO y Buenos Aires debido al sismo del 7 de marzo del 2020 (M5,4) a una misma escala. Se muestra la distancia hipocentral en cada uno.

La Fig. 7. muestra los valores de intensidad JMA máximos que se han registrado para cada estación en el período de tiempo analizado. Claramente la Zona Sur es la que ha experimentado valores más altos comparado con el resto del país. Luego de los máximos de 6- en Finca Naranjo, Laurel de Corredores y PIRO, se obtuvo un valor de 5+ en el Liceo de Finca Alajuela y la Municipalidad de Osa.

En el Valle Central, el único sitio con un valor de intensidad fuerte fue El Angel, cerca de Cariblanco de Sarapiquí, también con JMA=5+ seguido de Fraijanes de Alajuela con JMA=5- por el sismo de magnitud 5,3 ocurrido el 18 de febrero del 2023 cerca del epicentro del terremoto de Cinchona del 2009. Aparte de ese evento, todos los demás produjeron valores máximos de JMA=4.

En términos generales, el valor mayor de JMA registrado desde 1990 a la fecha en todas las estaciones del LISUCR ha sido 6-.

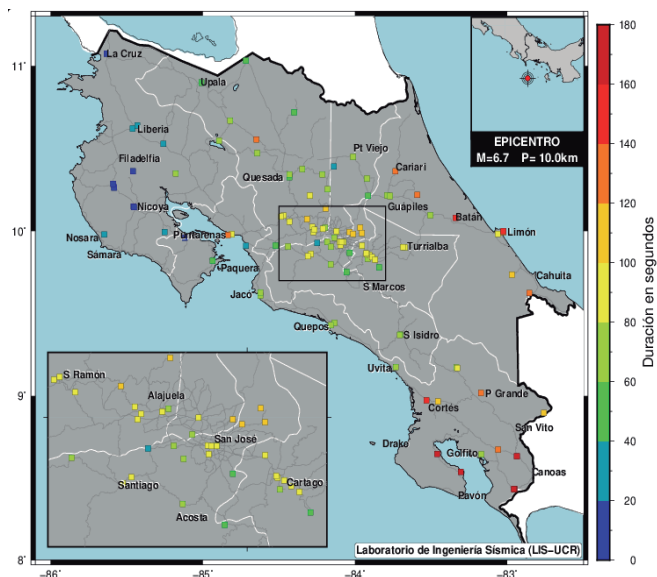


Fig. 5. Estimación de la duración del movimiento sísmico producido por el sismo del 21 de julio del 2021, M6,7. Este parámetro se calculó sumando el tiempo que la amplitud del registro se mantuvo por encima de 0,5 gales.

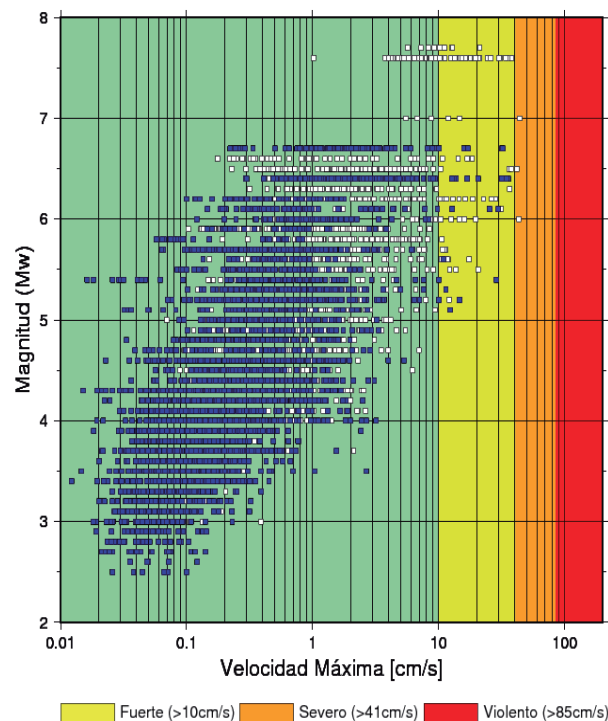


Fig. 6. Magnitud vs velocidad máxima. En blanco, registros desde 1990 al presente. En azul, los eventos del período de este estudio (escala modificada de [15]).

CONCLUSIONES

1. Siguiendo el patrón de distribución general de los sismos en el país, durante los últimos cinco años los eventos se han concentrado en dos zonas geográficas: la región central y sur del país. Hubo unos cuantos eventos de manitud mayor a 6,0 en el Pacífico Norte, solo uno en el centro del país y la mayoría ocurrió en el sur. La sismicidad de la región central muy probablemente está influenciada por la interacción de fallas corticales y sismicidad por subducción. Mientras tanto, en la región sur, la cercanía de la Zona de Fractura de Panamá y la sismicidad asociada puede ser responsable de la alta actividad.

2. La aceleración máxima del terreno observada en PIRO en la Zona Sur, 610,6 gales, pudo haber estado influenciado por las condiciones del suelo ya que en estaciones cercanas al epicentro los valores fueron casi la mitad. Las estaciones de la Zona Sur registraron valores de aceleración de 5-, 5+ y 6- en muchos casos. Por el contrario, en la región central del país, el máximo alcanzado ha sido de 5+ en un único sitio durante los últimos cinco años. El resto de estaciones del centro del país registró valores medios de JMA=4.

3. Las velocidades máximas registradas fueron de 35,6 cm/s, lo que sugiere un potencial daño estructural moderado a severo en edificaciones vulnerables, especialmente aquellas sin reforzamiento sísmico adecuado. Ningún sitio durante los últimos cinco años sobrepasó el umbral de 41 cm/s considerado como severo según la escala de [15]. También, ningún evento registrado desde 1990 hasta la fecha ha superado el umbral de 85 cm/s.

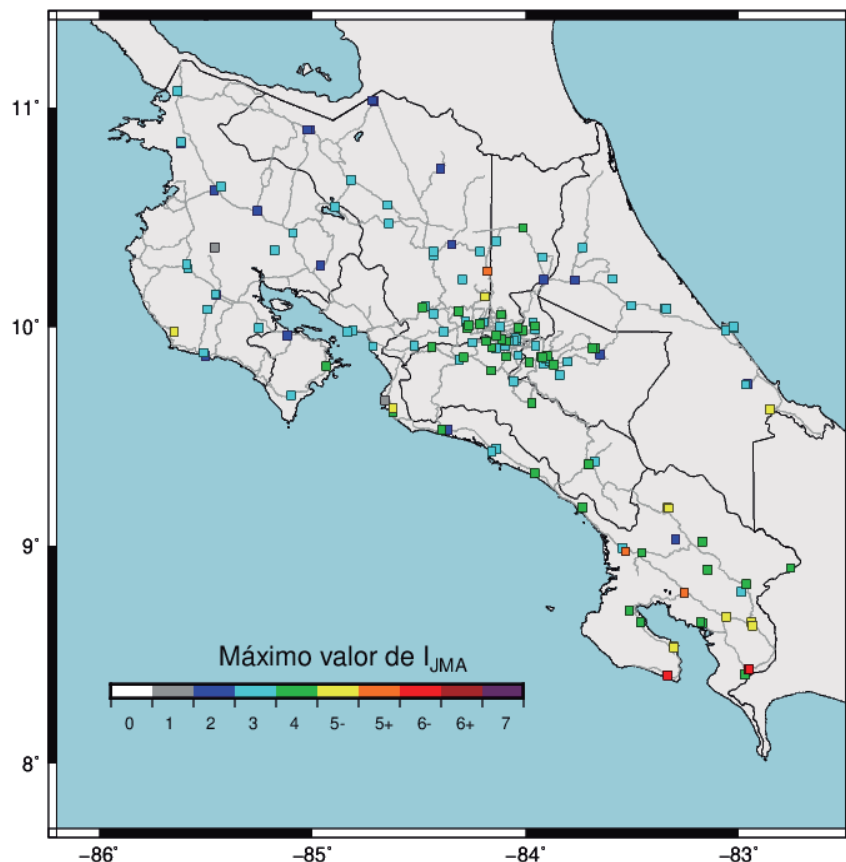


Fig. 7. Intensidades máximas registradas en cada estación acelerográfica desde el 01 de abril del 2019 al 30 de marzo del 2025.

4. Sería recomendable densificar la red acelerográfica en la Zona Sur ya que es clara la ocurrencia de sismos moderados a fuertes incluso en el corto tiempo de este análisis. Además de ello, la región es de sumo interés por el amplio desarrollo turístico que ha experimentado en los últimos años, lo que eventualmente se traduciría en creación de nueva infraestructura.

REFERENCIAS

- [1] K. T. Shabestari and F. Yamazaki. "A proposal of instrumental seismic intensity scale compatible with MMI evaluated from three-component acceleration records". *Earthquake Spectra*, 17(4), 711-723, 2001.
- [2] D. A. Hidalgo-Leiva et al., "The 2022 Seismic Hazard Model for Costa Rica," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 113, no. 1, pp. 23–40, Feb. 2023, doi: 10.1785/0120220119.
- [3] Goess, S., A. Velasco, S. Schwartz and T. Lay (1993). The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica ($M_w = 7.7$) earthquake and its tectonic implications: A broadband study, *J. Geophys. Res.*, 98, 8127-8142.
- [4] Suárez, G., M. Pardo, J. Domínguez, L. Ponce, et al. (1995). The Limón, Costa Rica earthquake of April 22, 1991 ($M_w = 7.7$): Evidence of back-arc thrusting and collisional tectonics in a subduction environment, *Tectonics*, 14, 518-530.

- [5] Adamek, S., F. Tajima and D. A. Wiens (1987). Seismic rupture associated with subduction of the Cocos Ridge, *Tectonics*, 6, 6, 757-774. doi:10.1029/tc006i006p00757.
- [6] M. Protti et al. "The March 25, 1990 ($M_w = 7.0$, $M_L = 6.8$), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: Its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity", *J. Geophys. Res.*, 100, B10, 20, 345-20, 358, 1995, doi:10.1029/94JB03099.
- [7] Bilek, S. and C. Lithgow-Bertelloni (2005). Stress change in the Costa Rica subduction zone due to the 1999 $M_w = 6.9$ Quepos earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230, 97-112, doi:10.1016/j.epsl.2004.11.020.
- [8] H. Yue et al., "The 5 September 2012 Nicoya, Costa Rica $M_w 7.6$ earthquake rupture process from joint inversion of high-rate GPS, strong-motion, and teleseismic P wave data and its relationship to adjacent plate boundary interface properties.", *J. Geophys. Res.*, 2013, 2013JB010187; doi:10.1002/jgrb.50379.
- [9] C. Liu et al., "Rupture processes of the 2012 September 5 $M_w 7.6$ Nicoya, Costa Rica earthquake constrained by improved geodetic and seismological observations.", *Geophysical Journal International*, 203(1), pp.175-183, 2015.
- [10] J. W. Alonso-Henar et al. "The Aguacaliente Fault, source of the Cartago 1910 destructive earthquake (Costa Rica)", *Terra Nova*, 25, 368-373, 2013, doi:10.1111/ter.12045.
- [11] S. L. Bilek et al. "Triggered seismicity associated with the 1990 Nicoya, Costa Rica, $M_w = 7.0$ earthquake", *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10, Q04S13, 2009, doi:10.1029/2008GC002317.
- [12] W. Montero and W. Rojas. "Las fallas Purires y Picagres, y su relación con la secuencia sísmica de Puriscal de 1990", *Revista Geológica de América Central*, 50, 39-69, 2014, doi:10.15517/rgac.v0i50.15107.
- [13] A. Quesada-Román, and G. Barrantes-Castillo. "Procesos de ladera cosísmicos del terremoto de Cinchona (Costa Rica) del 8 de enero de 2009 ($M_s = 6.2$).", *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 25, 1, 217-232, 2016, [fecha de consulta 22 de mayo del 2025]. ISSN: 0121-215X. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281843790015>
- [14] A. Moya, "Nuevo formato de datos para el Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica", *Ingeniería*, vol 16, no 2, pp 63-74, 2006.
- [15] C. B. Worden et al. "Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli intensity in California." *Bull. Seism. Soc. Am.* 102(1), 204-221, 2012, DOI: <https://doi.org/10.1785/0120110156>.

Adaptación de SeisComP al Monitoreo de Movimiento Fuerte en la Red Acelerográfica del LIS

SeisComP Adaptation for Strong Motion Monitoring in the LIS Accelerographic Network

Ing. Stuart Pérez Pérez
Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS), UCR
e-mail: jorgestwart.perez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

SeisComP, acelerógrafos, monitoreo sísmico, Python, Symfony, visualización web.

Keywords:

SeisComP, accelerographs, seismic monitoring, Python, Symfony, web visualization.

RESUMEN

Este trabajo describe la implementación del sistema SeisComP en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica, adaptado específicamente a su red nacional de acelerógrafos. Se detalla la integración de algoritmos desarrollados en Python para el análisis en tiempo real de eventos sísmicos, así como el diseño de una capa de presentación web basada en el framework Symfony, permitiendo la visualización interactiva de los resultados. La solución propuesta fortalece la interoperabilidad, la automatización del procesamiento de datos y la accesibilidad de la información, generando una plataforma eficiente para el monitoreo sísmico nacional y el apoyo a la gestión del riesgo en tiempo real.

ABSTRACT

This paper presents the implementation of the SeisComP system at the Seismic Engineering Laboratory of the University of Costa Rica, tailored specifically to its national strong-motion accelerograph network. It describes the integration of custom Python algorithms for real-time seismic event processing and the development of a web presentation layer using the Symfony framework, enabling interactive visualization of results. The proposed solution enhances interoperability, automates seismic data processing, and improves information accessibility, resulting in an efficient platform for nationwide seismic monitoring and real-time risk management support.

I. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica ha emprendido un proceso de modernización tecnológica con el objetivo de optimizar la recolección, procesamiento y difusión de información sísmica relevante para el país. En este contexto, se implementó el sistema

SeisComP, adaptado a la red nacional de acelerógrafos del laboratorio, lo cual requirió ajustes técnicos significativos y el desarrollo de herramientas computacionales personalizadas. Este trabajo detalla la metodología empleada para la integración del sistema, el diseño de algoritmos en lenguaje Python para el análisis automatizado de eventos y la construcción de una plataforma web utilizando el framework Symfony para la visualización interactiva de datos sísmicos, consolidando así una infraestructura robusta, escalable y orientada al servicio científico y social.

II. ANTECEDENTES

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) es una unidad especializada adscrita al Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (UCR). Desde su establecimiento, el LIS se ha consolidado como una entidad de referencia nacional y regional en el estudio y análisis de los efectos de los sismos sobre las estructuras, los suelos y las líneas vitales, con un enfoque orientado a la mitigación del riesgo sísmico en los centros de población. A diferencia de otras instituciones dedicadas al monitoreo sísmico, el LIS centra su labor en la ingeniería sísmica aplicada, realizando cálculos de efectos de amplificación, intensidad sísmica, espectros de respuesta y de diseño en informes de sismos fuertes.

El principal insumo de datos del laboratorio es su Red Acelerográfica de Movimiento Fuerte, la cual, al año 2025, está compuesta por 166 acelerógrafos digitales distribuidos estratégicamente en todo el país. Esta red incluye estaciones en campo libre (117 ubicaciones), edificios (13) y pozos instrumentados (3). Los sensores utilizados son principalmente de tipo triaxial, con una resolución de 24 bits y tecnología de fuerza balanceada (FBA), lo que garantiza una alta fidelidad en el registro de aceleraciones sin saturación del sistema. Además, se emplean sensores MEMS en estaciones donde se prioriza la densificación y el monitoreo de bajo costo. Todos los equipos transmiten sus datos en tiempo real a un servidor central, donde se procesan para generar análisis técnicos y científicos.

La cobertura de esta red se concentra en la Gran Área Metropolitana (GAM) y en zonas costeras del Pacífico, dada la mayor probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos intensos. Asimismo, se integran 12 estaciones acelerográficas adicionales en cooperación con el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), fortaleciendo la cobertura nacional. Esta infraestructura no solo permite un monitoreo preciso de la aceleración del suelo, sino que también alimenta investigaciones sobre amenaza sísmica, espectros de respuesta, intensidad y caracterización de fuentes sismogénicas, consolidando al LIS como un referente técnico-científico en la región.

III METODOLOGÍA

Para la implementación del sistema, se realiza una investigación previa de las herramientas actuales utilizadas por los principales centros de monitoreo sísmico y geológico del planeta, además, se consideran las necesidades específicas del laboratorio y se apuesta por preferir un

software opensource, con capacidad de mantenimiento prolongado y de uso extendido. El software escogido deberá, además, tener la capacidad de vincularse efectivamente con todas las marcas de fabricantes de acelerógrafos utilizadas en el laboratorio. Una vez definido el software SeisComP [1] se inicia con su estudio e implementación dentro de la red del laboratorio. Esta implementación implica un ajuste considerable al sistema, ya que por su naturaleza, el mismo está destinado al análisis sismológico puro, y a la utilización de una red de sismógrafos, lo cual contrasta con la red de acelerógrafos propia del laboratorio. Posterior a la implementación exitosa de la red, se construyen algoritmos propios que, integrados a la infraestructura del SeisComP, calculen valores de aceleración y construyan tablas de eventos sísmicos y sus características en un sistema web propietario, desarrollado en php, utilizando el framework de desarrollo abierto Symfony(REFERENCIA).

IV. MARCO TEÓRICO

El SeisComP (Seismological Communication Processor) es un sistema integral de adquisición, procesamiento, visualización y distribución de datos sísmicos en tiempo real, ampliamente utilizado por instituciones científicas, agencias de monitoreo sísmico y centros de alerta temprana alrededor del mundo. Fue desarrollado originalmente por el GFZ (German Research Centre for Geosciences) y posteriormente evolucionado comercialmente por GEMPA GmbH. El sistema se destaca por su arquitectura modular, su compatibilidad con estándares abiertos (como Mini-SEED, FDSN Web Services, y SeedLink) y su capacidad para integrar módulos especializados para detección, localización y análisis de eventos sísmicos [2]. SeisComP permite la integración de estaciones sísmicas a través de redes IP y ofrece herramientas como scolv, seiscomp-cli, y scconfig para la gestión, análisis visual y configuración del sistema. Su diseño permite tanto el uso local como distribuido en arquitecturas cliente-servidor, siendo compatible con protocolos modernos de transmisión de datos sísmicos. Uno de sus principales atractivos es su capacidad de personalización, siendo de código abierto en su versión básica.

Por su parte, Symfony es un framework de desarrollo web de alto rendimiento basado en el lenguaje PHP, diseñado bajo el patrón arquitectónico Modelo-Vista-Controlador (MVC). Fue creado por Fabien Potencier y es mantenido por SensioLabs. Symfony se ha consolidado como una de las plataformas más robustas para el desarrollo de aplicaciones web empresariales, al incorporar principios como la reutilización de componentes, la inyección de dependencias, el enrutamiento avanzado y la integración nativa con bases de datos mediante Doctrine ORM. Este framework facilita el desarrollo de aplicaciones escalables, seguras y altamente mantenibles, y se adhiere estrictamente a los estándares de desarrollo definidos por el PHP-FIG (PHP Framework Interoperability Group). Symfony también es conocido por ser la base de otras plataformas populares como Laravel y el sistema de gestión de contenidos Drupal 8 en adelante. Su ecosistema incluye herramientas como Flex, Profiler, y MakerBundle, que permiten acelerar la configuración y desarrollo de aplicaciones modernas mediante comandos y plantillas [3].

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la implementación del nuevo sistema de monitoreo y procesamiento de datos, se estableció una hoja de ruta que consistía en 3 etapas de desarrollo bien marcadas: 1) implementación de la red; 2) procesamiento de datos; y 3) Presentación de los datos.

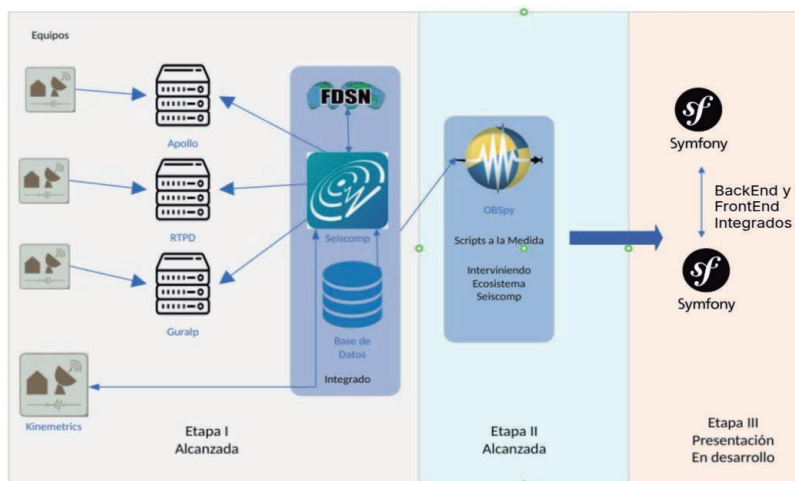


Fig. 1. Etapas de desarrollo del sistema.

A. Implementación del SeisComp

Durante la primera etapa, se compiló una versión propia del SeisComp, utilizando los archivos fuentes disponibles, paralelamente, se construyó el catálogo de estaciones acelerográficas del Laboratorio, que incluye la descripción de cada estación y su respuesta instrumental, guardando esta información en formato StationXML.

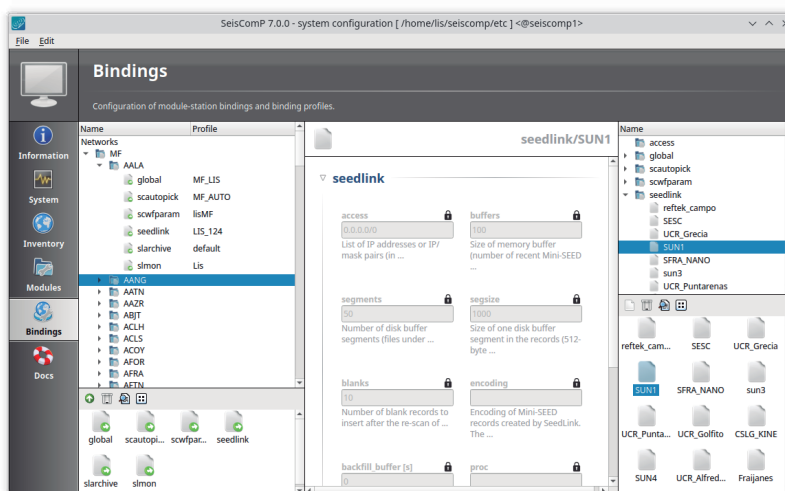


Fig. 2. Configuración del catálogo de estaciones.

La instalación y configuración del SeisComP se realizó buscando responder a los requerimientos del laboratorio, por lo cual, se establecieron conexiones en seedlink [4] para cada estación, así como configuraciones específicas para los algoritmos de detección y localización de eventos sísmicos.

Una vez implementada la red dentro del software, se logró tener un sistema centralizado, donde se obtienen los datos sísmicos de la totalidad de estaciones de la red del LIS, en tiempo real. Además, el sistema monitorea los datos, detecta eventos sísmicos, los localiza y calcula su intensidad y profundidad, pudiendo estos datos reflejarse en mapas personalizados, a solo instantes de ocurrido el evento.

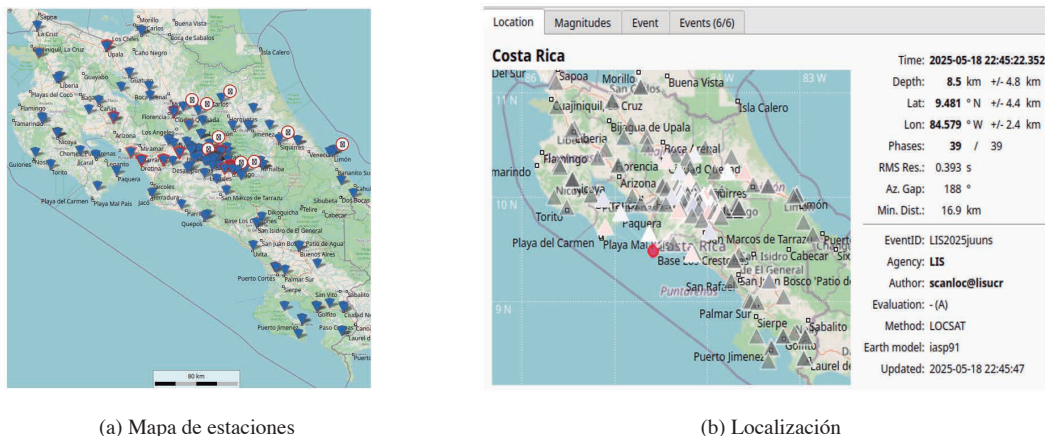


Fig. 3. Mapa de estaciones y localización.

El sistema implementado también permite utilizar el protocolo de consulta FDSN (Federation of Digital Seismograph Networks), el cual facilita el acceso interoperable y estructurado a los datos sísmicos de la red, incluyendo formas de onda, metadatos de estaciones y catálogos de eventos, pudiendo estos datos ser descargados en formatos normalizados como MiniSeed, StationXML y QuakeML [5].

A su vez, la implementación del SeisComP permitió mejorar el monitoreo de la salud de la red de acelerógrafos, logrando obtener estadísticas en tiempo real de la calidad de las conexiones, latencias, porcentajes de desconexión, entre otras, utilizando un servidor de analítica de datos libre (Zabbix).

B. Procesamiento de Datos

En el ámbito del procesamiento de datos sísmicos, se desarrollaron scripts personalizados utilizando el lenguaje de programación Python, los cuales fueron integrados de forma directa con la infraestructura modular del sistema SeisComP, mediante el empleo de sus bibliotecas nativas, estructuras de datos y objetos definidos dentro de su entorno de desarrollo. Esta integración permitió incorporar dichos scripts al sistema interno de mensajería de SeisComP, habilitando la escucha

activa de eventos sísmicos, su detección automática y el procesamiento en tiempo real de la información generada por las estaciones de la red.

Las rutinas computacionales desarrolladas permiten acceder dinámicamente a la red sísmica disponible, descargar las formas de onda correspondientes a un evento específico, calcular la respuesta instrumental de cada estación involucrada, representar gráficamente los resultados obtenidos y almacenarlos de manera estructurada en la base de datos propia de SeisComP. Gracias a la flexibilidad y eficiencia del lenguaje Python, estos scripts fueron diseñados con capacidades de ejecución concurrente, aprovechando al máximo los recursos de hardware del servidor mediante el uso de múltiples hilos (threads) de procesamiento. Esta estrategia permitió una optimización significativa del rendimiento, reduciendo de manera exponencial los tiempos de cálculo y posibilitando el procesamiento completo de la red de estaciones en escalas de tiempo del orden de segundos.

C. Presentación de los Datos

Finalmente, para la presentación de los datos, la información procesada por los scripts es adquirida por la capa de presentación via SQL, y presentada en formato php, utilizando en framework Symfony. Esta etapa, aunque se encuentra aún en desarrollo, permite presentar los datos de manera visual gracias a la implementación de mapas, donde se puede apreciar la localización de los eventos, fecha específica y su intensidad, además, se crearon mapas con los valores de aceleración registrados por los equipos, para facilitar la comprensión visual de la intensidad del movimiento en lugares específicos del país.

Esta capa de presentación, al ser implementada en el framework Symfony, permite utilizar las virtudes del Modelo-Vista-Controlador, adecuarse a los estándares de desarrollo internacionales, así como mantener un modelo de escalabilidad y reutilización de componentes, o cual permite desarrollar aplicaciones robustas con menor esfuerzo y mayor coherencia estructural.

El trabajo a futuro consistirá en un sitio web robusto, donde se pueda visualizar con facilidad toda la información referente y pertinente a los eventos sísmicos de interés del laboratorio, así como un hub de información para facilitar la investigación y respaldar el trabajo de los investigadores y el interés del público general.

CONCLUSIONES

La implementación del sistema SeisComP en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica permitió establecer una plataforma robusta, interoperable y escalable para el monitoreo de eventos sísmicos en tiempo real, adaptada específicamente a una red de acelerógrafos. Esta adecuación técnica, que implicó ajustes significativos al software original orientado a sismógrafos, evidencia la versatilidad del sistema y su aplicabilidad en contextos no convencionales, lo cual fortalece la capacidad de respuesta científica ante eventos de movimiento fuerte en el país.

La integración de scripts personalizados en lenguaje Python, alineados con la arquitectura modular de SeisComP, demostró ser una solución eficiente para el procesamiento automatizado de

datos sísmicos. Esta implementación posibilitó la extracción, análisis y representación gráfica de formas de onda, así como el almacenamiento estructurado de resultados, optimizando significativamente los tiempos de ejecución mediante programación concurrente. Lo cual redundó en una mejora sustancial de la capacidad operativa del laboratorio y en la calidad del análisis de eventos sísmicos registrados.

El uso del framework Symfony para la capa de presentación de datos facilitó la construcción de una interfaz web dinámica y funcional, que permite visualizar mediante mapas interactivos la localización, magnitud e intensidad de los eventos sísmicos registrados. La adherencia a principios como el Modelo-Vista-Controlador (MVC) y los estándares internacionales de desarrollo web garantiza la mantenibilidad y escalabilidad del sistema, proyectando a futuro una herramienta integral que combine ciencia, tecnología e información accesible para investigadores, tomadores de decisiones y el público general.

REFERENCIAS

- [1] Helmholtz Centre Potsdam GFZ German Research Centre for Geosciences y gempa GmbH, “SeisComP”, 2008, Potsdam.
- [2] W. Hanka, J. Saul, B. Weber, J. Becker, y P. Harjadi, “Real-time earthquake monitoring for tsunami warning in the Indian Ocean and beyond”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, núm. 12, pp. 2611–2622, dic. 2010, doi: 10.5194/nhess-10-2611-2010.
- [3] Symfony SAS, “Symfony Documentation”. Consultado: el 21 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://symfony.com/doc/current/index.html>
- [4] “Protocol — SeedLink”. Consultado: el 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://docs.fdsn.org/projects/seedlink/en/latest/protocol.html?utm_source=chatgpt.com
- [5] “FDSN: FDSN Web Services”. Consultado: el 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fdsn.org/webservices/>

Monitoreo a largo plazo de vibraciones de un edificio de gran altura

Long-term vibration monitoring of a high-rise building

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:

Dinámica de estructuras, monitoreo de largo plazo, monitoreo de salud estructural, vibración ambiental.

Keywords:

Ambient vibrations, long-term monitoring, structure dynamics, structural health monitoring.

RESUMEN

Las frecuencias naturales de las obras civiles son el indicador cuantitativo más utilizado para el monitoreo de la salud estructural (MSE), sin embargo, se ha encontrado en literatura técnica internacional que, dependiendo del tipo de estructuras, las frecuencias modales fluctúan ante variaciones de factores ambientales como temperatura, humedad, niveles de excitación, entre otros. Este tipo de estudios no han sido realizados en un país tropical como el nuestro, por lo tanto, esta investigación busca estudiar la variación temporal de las frecuencias naturales a largo plazo del edificio Torre Uno Paseo Colón, el segundo edificio más alto de Costa Rica, para la extracción de tendencias o estacionalidades y su correlación con los factores ambientales durante un plazo de 18 meses en forma continua. Se emplean datos vibratorios de 10 minutos por cada hora obtenidos por el sistema de monitoreo permanente instalado por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS-UCR) y promedios horarios de las variables meteorológicas. Los resultados muestran que las 2 variables determinantes en las fluctuaciones de las frecuencias naturales fundamentales (de frecuencias menores a 2 Hz) del edificio son la media móvil de humedad relativa y la amplitud de vibración del edificio, y por el contrario, tiene muy poca correlación con la temperatura.

ABSTRACT

The natural frequencies of civil infrastructures are the most widely used quantitative indicator for structural health monitoring (SHM); however, international technical literature has shown that, depending on the type of structure, modal frequencies fluctuate with variations in environmental factors such as temperature, humidity, excitation levels, etc. However, this study has never been conducted in a tropical country like Costa Rica. Therefore, this research seeks to study the long-term variation of the natural frequencies of the Torre Uno Paseo Colón building, the second tallest building in Costa Rica, in order to extract trends or seasonalities and

their correlation with environmental factors over a period of 18 months continuously. This data is obtained with 10-minute vibration data per hour obtained by the permanent monitoring system installed by the Earthquake Engineering Lab (LIS-UCR) and hourly averages of meteorological variables. The results show that the two determining variables in fluctuations in fundamental natural frequencies (frequencies below 2 Hz) of the building are the moving average of relative humidity and the building's vibration amplitude, and on the contrary, it has minimal correlation with temperature.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las metodologías del monitoreo de la salud estructural (MSE) basado en vibraciones comúnmente empleadas en las estructuras civiles es conocida como el Análisis Modal Operacional (OMA, de "Operational Modal Analysis"), la cual recurre a métodos de identificación de sistemas dinámicos para extraer los parámetros modales de una estructura a partir de los datos de vibraciones ambientales registradas en condición operacional [1]. La detección de daño a partir de la identificación de cambios en los parámetros modales es el objetivo principal del OMA. Sin embargo, internacionalmente se ha encontrado que el parámetro modal más utilizado para este propósito, las frecuencias naturales, sufren de variaciones también debido a fluctuaciones en las variables ambientales. Por ejemplo, se encontró en el monitoreo durante un año del puente Z24 ubicado en Suiza, que es posible detectar daño en el puente con base en variación de frecuencias hasta después de hallar un modelo autoregresivo entre las frecuencias y la variación de la temperatura [2]. Xia et al. [3] hicieron una revisión de literatura técnica sobre la variación de las características vibratorias de estructuras civiles ante cambios de temperatura. Se encontró que la mayoría de los estudios muestran que las estructuras experimentan reducción en sus frecuencias con el aumento de temperaturas. Por otro lado, un edificio de concreto reforzado de tres niveles ubicado en Nueva Zelanda fue sometido a un monitoreo a largo plazo durante 4 años y se encontró que las características modales del edificio son sensibles a los niveles de la excitación y de la respuesta, y se observa una tendencia a la reducción en las frecuencias fundamentales en el tiempo [4]. También hay un estudio sobre 6 edificios con alturas alrededor de los 100 m, y de diferentes tipologías estructurales, que fueron monitoreados durante unos 20 años (2001 a 2021), y se encontró que las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, ejercen influencias distintas en las frecuencias según la tipología estructural y hasta contradictorias, pero se confirman sus efectos en las propiedades dinámicas y que la temperatura es el factor que más influye en ellas [5]. No obstante, se observa que se carece de estudios realizados en el clima tropical, y este es justamente el objetivo de la presente investigación: estudiar la variación temporal de las frecuencias naturales a largo plazo de un edificio de gran altura y su correlación con los factores ambientales del clima tropical.

II. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LAS FRECUENCIAS NATURALES FUNDAMENTALES DEL EDIFICIO Y VARIABLES METEOROLÓGICAS

Se registraron bloques de datos de 10 minutos duración y con 10 canales de aceleración lateral en ambos ejes del edificio y estos fueron procesados con el método SSI-COV [6]. Se utilizaron

70 bloques de covarianzas para la matriz Toeplitz y un orden de sistema de 40 como parámetros del método y con una tasa de muestreo reducida a 10 Hz. Las primeras 5 frecuencias identificadas en el tiempo se muestra en la Fig. 1, los espacios en blanco que se observan en la figura corresponden a periodos en que el sistema de monitoreo estuvo fuera de línea. A pesar de la dispersión en las frecuencias identificadas en el tiempo, es posible detectar cierta estacionalidad y que es común en estos 5 modos: las frecuencias experimentaban fluctuaciones leves a lo largo del tiempo, llegaron al punto más alto cerca del día 310 (al final de octubre del año 2020, en los tiempos más lluviosos), luego se reduce levemente hasta llegar al mínimo cerca del día 430 (inicios de marzo del año 2021), después vuelve a subir levemente; a pesar de que después del día 530 hasta el día 600 no se tiene datos, se observa que posterior al día 600 las frecuencias tienen una leve tendencia a bajar otra vez, de forma tal que pareciera repetir el mismo patrón con un periodicidad anual. Por otro lado, en el lado derecho de la Fig. 1 (acercamiento) se puede apreciar variaciones horarias, aunque leves, especialmente en las frecuencias del modo 2 y 4 que repite un patrón periódico diario con una apariencia de “dientes de sierra”, además de las fluctuaciones de mayor plazo. A partir de estos patrones oscilatorios diarios, así como fluctuaciones estacionales, se buscará validar la hipótesis de que estas variaciones en las frecuencias naturales están correlacionadas con algunas variables meteorológicas siendo este el objetivo primordial de esta investigación.

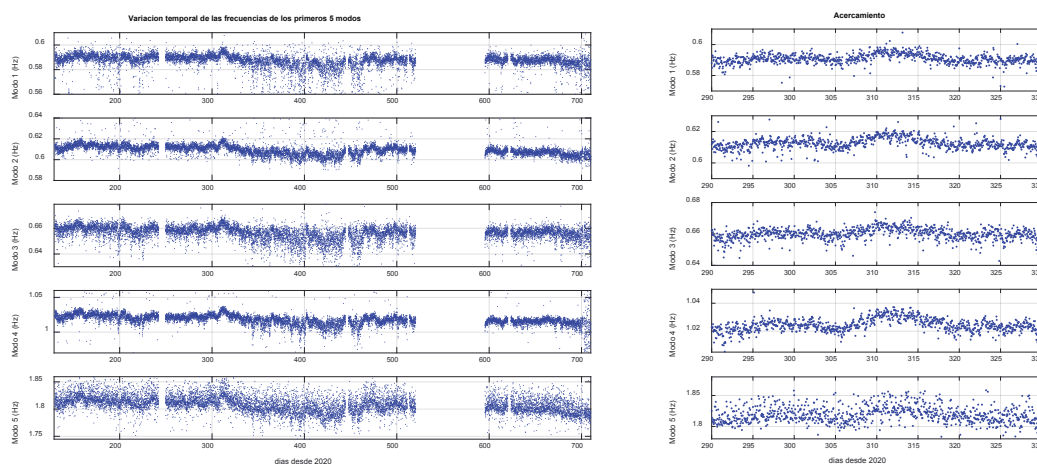


Fig. 1. Variación temporal de las frecuencias de los primeros 5 modos y un acercamiento a las variaciones horarias con un patrón de periodicidad diaria.

Las variables meteorológicas facilitadas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y analizadas en esta investigación son: la humedad relativa, temperatura, precipitación, velocidad de viento y la radiación solar. Los datos provistos son valores promedios por cada hora (precipitación es acumulado por hora) y abarcan fechas desde el primero de enero de 2020 hasta el 31 de enero del año 2022. La variación temporal de las variables meteorológicas contempladas puede visualizarse en la Fig. 2.

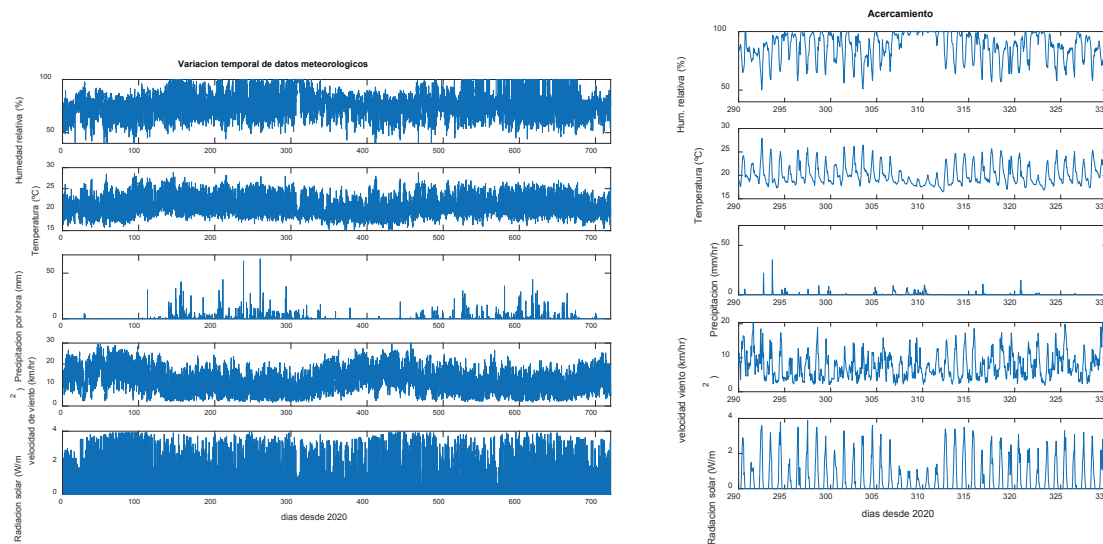


Fig. 2. Variación temporal de los datos meteorológicos y un acercamiento a las variaciones horarias y la periodicidad diaria.

Un aspecto importante por destacar es que las variables meteorológicas tampoco son independientes una de la otra [7]. Si se compararan las Fig. 1 y 2, especialmente en los alrededores del día 310, se observan que las frecuencias fluctúan hacia un valor máximo mientras que las oscilaciones diarias (con una periodicidad de 24 horas) persisten. Cualitativamente es evidente que esta fluctuación está correlacionada con la humedad relativa, pues, aunque la variación de temperatura posee un comportamiento similar, pero de manera inversa, la línea base de la temperatura no experimenta reducción en comparación con otros momentos cuando no se da esta subida significativa de frecuencias, lo cual sí se da con la humedad relativa. Además, si esta variación de frecuencias se debiera a cambios de temperatura, la amplitud de las oscilaciones diarias mencionadas debería también reducirse en concordancia con lo ocurrido con la temperatura, pero se evidencia que la realidad es otra. A partir de este razonamiento, se deduce que la causa primordial de este aumento de frecuencias cerca de los días 310 es el incremento particular de la humedad relativa en esos días, que incluso, posiblemente no se trataría de una dependencia hacia la humedad instantánea sino a sus efectos retardantes en el tiempo. Bajo este razonamiento, se grafican en la Fig. 3 las frecuencias del modo 1, a manera de ejemplo, versus: a) humedad relativa horaria, b) su media móvil de 96 horas y c) su media móvil de 48 horas. Visualmente se observa correlación entre las variables y una menor dispersión de datos en la media móvil con 96 horas. En forma cuantitativa, el coeficiente de correlación r y el coeficiente de determinación R^2 experimentan una mejoría progresiva en sus valores al aumentar la duración de la media móvil hasta las 96 horas, a pesar de que no son valores muy altos debido a la dispersión de los datos. Sin embargo, también es importante recordar que las frecuencias podrían estar en función de otras variables no tomadas en cuenta en estos gráficos. La Fig. 4 muestra los gráficos de las frecuencias versus temperatura y su media móvil. En la comparación directa con la temperatura, los valores de r y R^2 son muy cercanos a cero, indicando que la relación entre las variables es muy débil o nula; en los casos de media móvil de temperatura, sí se observa leve mejoría en r , pero no tanto en R^2 , *i.e.*, el modelo de regresión no puede explicar la

variabilidad en la variable dependiente. En otras palabras, la variable independiente no es un buen predictor de la variable dependiente, o que hay otros factores que tienen una influencia mucho mayor.

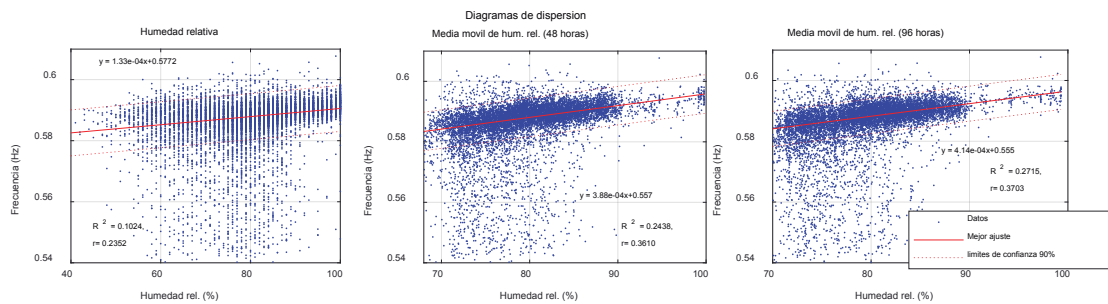


Fig. 3. Correlación de frecuencias de modo 1 versus humedad relativa y su media móvil.

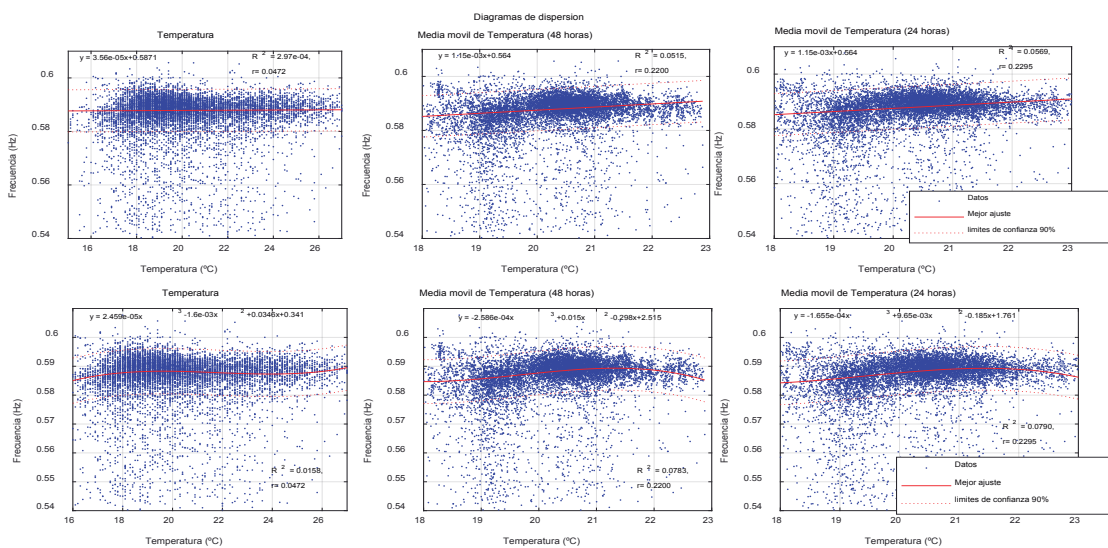


Fig. 4. Correlación de frecuencias de modo 1 versus temperatura y su media móvil utilizando modelos de regresión de: a) una recta de mejor ajuste y b) un polinomio de grado 3 como curva de mejor ajuste.

En un análisis similar, se determinó que la velocidad de viento también una variable que posee una importante correlación con la variación de las frecuencias y especialmente con las variaciones horarias y el patrón cíclico diario, pero de manera inversa: a mayor velocidad de viento, menores son las frecuencias. Dado que el viento es una fuente de excitación a la estructura, *i.e.*, a mayor velocidad, mayor amplitud tendrá la deformación o la aceleración. Considerando que las estructuras civiles de concreto reforzado no son sistemas perfectamente lineales cuya rigidez generalmente disminuye con el incremento de deformación, es de esperar que se experimente una reducción de frecuencias a mayor amplitud de vibración. De ser así, es de esperar que la correlación mencionada entre las frecuencias y la velocidad de viento adquiriría aún más sentido al compararse directamente con la amplitud de la vibración, la cual se evidencia en la Fig. 5. Se utilizaron la media cuadrática (RMS) de la aceleración del nivel superior del edificio como indicador de la amplitud de vibración,

y se limita a frecuencias menores a 2 Hz debido a que por encima de esta frecuencia, se observa que las vibraciones se empiezan a relacionar más con las actividades antropogénicas.

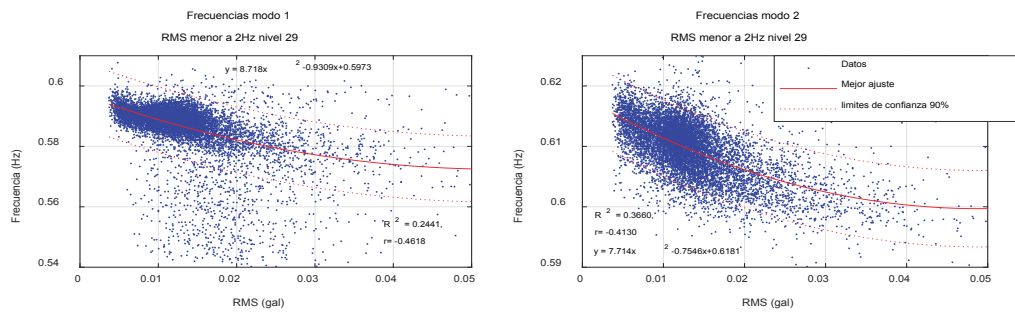


Fig. 5. Correlación de frecuencias de los modos 1 y 2 versus RMS de aceleración del edificio.

III. IDENTIFICACIÓN DE UN MODELO ESTÁTICO DE CORRELACIÓN PARA LA VARIACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NTURALES FUNDAMENTALES DEL EDIFICIO

Dadas las correlaciones “estáticas” que se observan entre la media móvil de humedad relativa con una ventana de 96 horas de retardo, la RMS de aceleración del edificio con frecuencias menores a 2 Hz y la variación de las frecuencias naturales, se puede proponer un modelo regresivo polinomial multivariable que las relacione con las frecuencias naturales:

$$y = a_1x_1 + b_1x_2^2 + b_2x_2 + c_1x_3^2 + c_2x_3 + d_1x_4 + cte \quad (1)$$

Aquí, y es la frecuencia (Hz), x_1 es la media móvil de 96 horas de humedad relativa (%), x_2 es la RMS del nivel superior con frecuencias menores a 2 Hz (gal), x_3 es la velocidad el viento (km/hr), x_4 es la temperatura (°C), y cte sería el intercepto que en principio debe estar asociado a la condición inicial de la serie de frecuencias. Por simplicidad, se han incluido todas las variables meteorológicas contempladas anteriormente para luego, determinar el aporte relativo del término polinomial asociado a cada variable meteorológica.

Se utilizaron los datos desde el día 129 hasta alrededor de los días 520 para realizar esta regresión lineal, debido a que después de este último se encuentran varios lapsos de tiempo relativamente largos sin datos y se resolvieron las incógnitas mediante mínimos cuadrados. Se muestra en la Fig. 6 el aporte de las variables meteorológicas contempladas y también la RMS de aceleración, con las variaciones temporales de las frecuencias del modo 1 y 2. Con el fin de facilitar la comparación del grado de participación de cada variable, se le ha substraído la media al aporte de cada variable meteorológica, de modo que tenga línea base igual a cero y se puede comparar, en forma y magnitud, el aporte de cada uno.

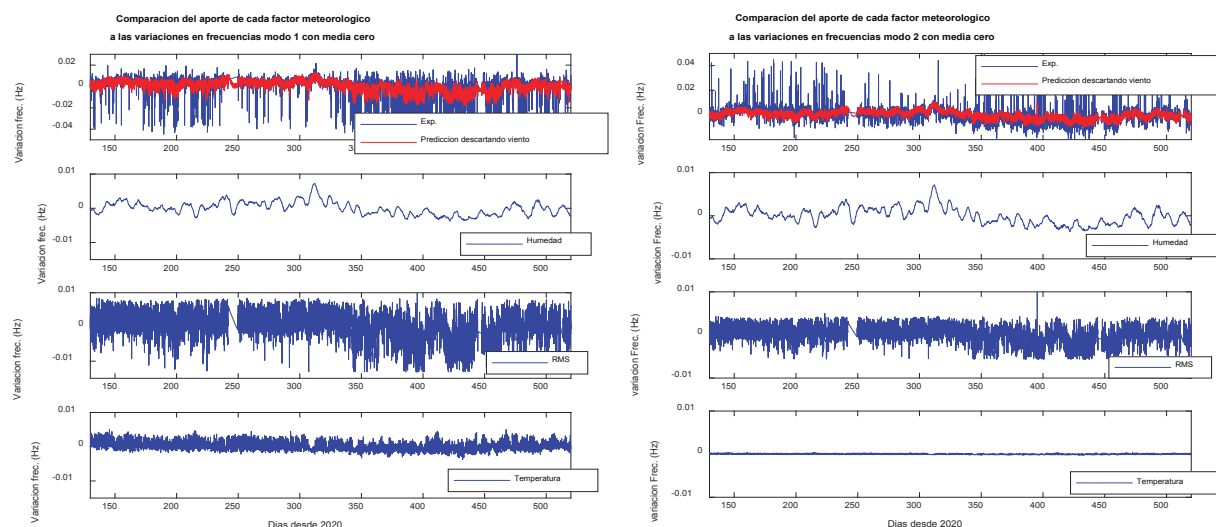


Fig. 6. Comparación del aporte de las variables meteorológicas y de la RMS de aceleración en las frecuencias de los modos 1 y 2, con media cero.

Lo observado en esta Fig. 6 demuestra que la RMS de aceleración tiene el mayor aporte y especialmente en las variaciones cíclicas diarias, seguido por la humedad relativa que explicaría las fluctuaciones estacionales, y por último la temperatura, cuyo aporte en la variación de las frecuencias del modo 1 es menos de 1/5 parte de lo que aporta la RMS de aceleración y en el modo 2 es totalmente insignificante.

CONCLUSIONES

Se realizó un monitoreo de largo plazo durante 18 meses al edificio Torre Uno Paseo Colón para estudiar la variación temporal de las frecuencias naturales y su correlación con las variables meteorológicas en un clima tropical. Se encontró que las 2 variables determinantes en las fluctuaciones de las frecuencias naturales fundamentales (con frecuencias menores a 2 Hz) del edificio son la media móvil de la humedad relativa y la amplitud de aceleración del edificio medida en RMS, y a diferencia de lo encontrado en la literatura técnica internacional, las variaciones en temperatura no correlacionan de forma significativa.

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] R. Brincker y C. Ventura, *Introduction to Operational Modal Analysis*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2015.

- [2] B. Peeters y G. De Roeck, “One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events,” *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, vol. 30, pp. 149–171, 2001.
- [3] Y. Xia, B. Xu, H. Hao, y L. Bai, “Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies,” *J. Civil Struct. Health Monit.*, vol. 2, pp. 29–46, 2012, doi: 10.1007/s13349-011-0015-7.
- [4] F. Butt y P. Omenzetter, “Long term seismic response monitoring and finite element modeling of a concrete building considering soil flexibility and non-structural components,” en *Proc. SPIE 7981, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2011.
- [5] Y. Dong, W. Liu, J. Zhang, y J. Li, “Long-term monitoring of dynamic characteristics of high-rise and super high-rise buildings using strong motion records,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 12, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1177/16878140211067279.
- [6] Y. C. Liu, C. H. Loh, y Y. Q. Ni, “Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower 508 under abnormal loading condition,” *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 42, pp. 477–498, 2012.
- [7] J. Wright, “Correlación entre algunos parámetros climáticos y la hora del día en Heredia, Costa Rica,” *UNICIENCIA*, vol. 14, no. 1, pp. 67–76, 1997.

Diseño de un control por aceleración para RTHS basada en fuerza inercial

Acceleration control design for Inertial-Based Real-Time Hybrid Substructuring

Yi Cheng Liu Kuan

Escuela de Ingeniería Civil, UCR

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

Sergio Lobo Aguilar

Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: sergio.lobo@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

Pablo Agüero Barrantes

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales,

Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Ensayos, control, dinámica, estructuras, subestructuración.

Keywords:

Tests, control, dynamics, structures, substructuring.

RESUMEN

La Subestructuración Híbrida en Tiempo Real (RTHS) es una técnica de ensayo que requiere sistemas de transferencia para acoplar la dinámica entre componentes físicos y numéricos de un sistema estructural. Tradicionalmente, los actuadores son los responsables de esta función. Este estudio busca validar el uso de un sistema de transferencia inercial como estrategia alternativa, en el cual se aplica la fuerza calculada numéricamente

mediante el control de la aceleración de una masa móvil unida a la subestructura física. Para ello, se identificó un modelo de “caja negra” de la masa activa mediante el método de identificación de subespacios N4SID, el cual fue convertido a un modelo de “caja gris” mediante una transformación matricial de dos pasos. Se adoptó el control convencional por realimentación de estados completos mediante el filtro de Kalman y el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) para la estimación del estado y la matriz de ganancia del controlador respectivamente, pero con un modelo de espacio de estados de tercer orden que comprende el desplazamiento, la velocidad y la aceleración como estados de realimentación. También se diseñó una función de transferencia de integrador para calcular el desplazamiento y la velocidad deseados a partir de la aceleración objetivo.

ABSTRACT

Real-Time Hybrid Substructuring (RTHS) is a testing technique which requires transfer systems to couple the dynamics of physical and numerical components of structural systems, and traditionally actuators are the ones who play this role. This study aims to validate the use of an inertial transfer system as an alternative strategy, where a numerical force is applied through the control of the acceleration of a movable mass attached to the physical substructure. To achieve this, a “black box” model of the active mass was identified using the N4SID subspace identification method and mapped to a “gray box” model through a two-step matrix transformation. The conventional full-state feedback control with Kalman filter and Linear Quadratic Regulator (LQR) algorithm was adopted for the state and control gain estimation, but with a 3rd order State-Space model that encompasses displacement, velocity and acceleration as the feedback state. An integrator transfer function is also designed to compute the desired displacement and velocity from the goal acceleration.

I. INTRODUCCIÓN

La Subestructuración Híbrida en Tiempo Real (RTHS) es una técnica de ensayo de laboratorio desarrollada para estudiar la respuesta de una estructura sometida a cargas dinámicas [1]. Para ello, la divide en componentes físicos y numéricos, que posteriormente se acoplan mediante sistemas de transferencia. La RTHS es una estrategia que permite simular y evaluar la respuesta y el desempeño de sistemas estructurales a un costo mucho menor que ejecutar ensayos totalmente físicos, puesto que componentes físicos cuyo comportamiento es difícil o imposible modelarse numéricamente pueden interactuar en tiempo real con modelos de sistemas estructurales cuya representación numérica ha sido bien estudiada y estandarizada, pudiendo así reunir la ventaja de cada parte para obtener los resultados [2].

Las configuraciones experimentales tradicionales para RTHS suelen utilizar actuadores o mesas vibratorias como sistemas de transferencia. Sin embargo, se han explorado estrategias alternativas para acoplar ambas subestructuras. Este estudio busca validar el uso de un sistema de transferencia inercial, originalmente propuesto por Vanase III et al. en 2023 [3]. Como indica su nombre, en esta estrategia se busca aplicar la fuerza generada por la subestructura numérica a la física mediante el control de la aceleración de una masa activa, fijada a la subestructura física. Algunos ejemplos donde es se podría aplicar dicha estrategia son los sistemas susceptibles a la interacción suelo-estructura y estructuras con aislamiento de base sometidas a terremotos.

Para lograr el objetivo anterior, se propone en esta investigación el diseño de una estrategia de control por aceleración con realimentación de estados completos mediante el filtro de Kalman y

el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) pero con un modelo de espacio de estados de tercer orden que comprende el desplazamiento, la velocidad y la aceleración como estado de realimentación, además del diseño de una función de transferencia de integrador para calcular el desplazamiento y la velocidad deseados a partir de la aceleración objetivo. La estrategia fue implementada y validada a través de un sistema de masa activa impulsada por un servomotor lineal IP02 de la marca Quanser como se ilustra en la Fig. 1.

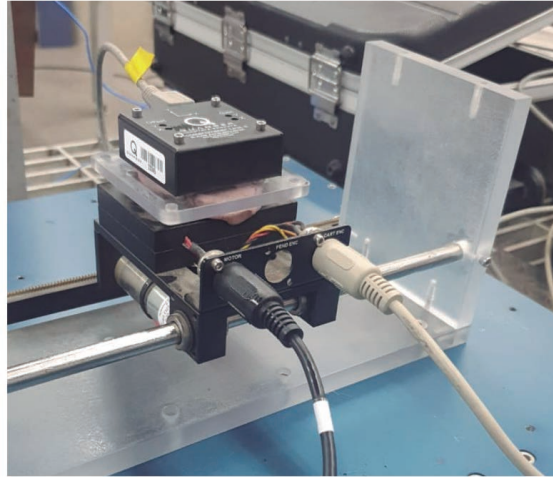


Fig. 1. Masa activa impulsada por un servomotor lineal IP02 de la marca Quanser.

II. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA

A. Identificación del modelo de caja negra por el método subespacial N4SID

En esta investigación, se propone la identificación de un modelo de espacio de estados de tercer orden, con el fin de disponer de la aceleración como el parámetro cuya trayectoria se necesita regular. Así, la ecuación del modelo de espacio de estados de tercer orden por identificar puede expresarse en términos de la masa m , el amortiguamiento viscoso equivalente c y una “rigidez equivalente” k (que busca tomar en cuenta la fricción y otros factores) de la siguiente manera:

$$\dot{X} = A_c X + B_c u \quad ; \quad \begin{pmatrix} \dot{x}_{car} \\ \dot{x}_{car} \\ \ddot{x}_{car} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k/m & -c/m & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{car} \\ \dot{x}_{car} \\ \ddot{x}_{car} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ B/m & 0 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_m \\ \dot{V}_m \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Y = C_c X \quad ; \quad \begin{pmatrix} x_{car} \\ \ddot{x}_{car} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{car} \\ \dot{x}_{car} \\ \ddot{x}_{car} \end{pmatrix} \quad (2)$$

El planteamiento anterior constituye un modelo de “caja blanca”, en donde X es el vector estado, A_c es la matriz del sistema en tiempo continuo, B_c es la matriz de entradas, C_c es el vector de salida, es

la matriz de observación, es el desplazamiento de la masa activa (carrito), es un coeficiente que relaciona el voltaje de comando y la fuerza electromotriz generada. Mientras tanto, la tercera fila de la ecuación del estado está relacionada con el tirón (tercera derivada de la posición) y se obtiene derivando la ecuación de movimiento de la masa activa. El tirón es una cantidad física que ha sido utilizada anteriormente en la generación de trayectorias suaves para robots industriales, impresoras en tres dimensiones, maquinaria y motores [4]. Al ser los coeficientes c y k cantidades equivalentes, lo mismo el coeficiente que conllevan sus simplificaciones, se expresaría la ecuación del tirón como una función del estado completo () multiplicado por los factores , e igualmente la fuerza electromotriz como función del voltaje y su derivada ponderada por los factores . V_m es el voltaje de comando y $\dot{V}$ es la derivada del voltaje de comando.

La correcta identificación de los parámetros dinámicos del carrito es esencial para lograr controlarlo. En aras de implementar métodos de control óptimo mediante LQR, se identificaron experimentalmente las matrices , y del modelo “caja negra” de espacio de estados en tiempo continuo con el método de identificación mediante subespacios N4SID [5] y [6] basado en datos de entrada y salida. Se emplearon dos tipos de señales de entrada para la identificación: a) un ruido blanco de ancho de banda limitada (hasta 8hz) y b) una onda cuadrada de 4 Voltios de un periodo de 2 segundos (en otras palabras, pulsos de 4 Voltios de 1 s de duración, pero intercalados con signos negativos). Se obtuvieron mediciones de desplazamiento del carrito por medio de un sensor incorporado en el mismo, así como de aceleración al añadir un acelerómetro encima del carrito.

Cabe destacar que los estados asociados a las matrices identificadas con el método N4SID no son estados físicos, por lo que una transformación de coordenadas es requerida para convertir estos estados generalizados a las variables físicas de interés.

B. Mapeo al modelo de caja gris mediante una transformación de 2 pasos

Según [7], una vez que se obtengan las matrices , y identificados en tiempo continuo, se puede emplear una transformación lineal de 2 pasos para lograr convertir estas matrices de “caja negra” a nuevas matrices asociadas a estados físicos de la “caja blanca” mediante una transformación de 2 pasos. La primera transformación consiste en encontrar una matriz de transformación T que convierta las matrices en una nueva realización , haciendo cumplir la condición dada por la matriz de observación:

$$\bar{C} = \tilde{C}T^{-1} \quad (3)$$

La segunda transformación consiste en hallar una matriz de transformación V que mapea la realización a la realización correspondiente al espacio de los estados físicos :

$$A_c = V \bar{A} V^{-1} \quad B_c = V \bar{B} \quad C_c = \bar{C} V^{-1} \quad (4)$$

La matriz debe satisfacer la condición de que no modifique la matriz que ya cumple con , por lo tanto:

$$C_c = \bar{C}_c V^{-1} = \bar{C}_c \quad (5)$$

C. Condición adicional para la depuración de la matriz .

A pesar de la transformación de 2 pasos, las entradas la matriz de entrada aún requieren ser ajustados para llegar a la estructura mostrada en (1). Adicionalmente, se debe hacer cumplir que la segunda derivada de la primera salida sea igual a la salida . Este criterio se utilizó para ajustar las entradas de la matriz , minimizando el error entre la 2da derivada de la salida de desplazamiento y la salida de aceleración de la simulación que realiza el modelo de espacio de estados, mapeado mediante la transformación de 2 pasos, utilizando a un ruido blanco de banda limitada (BLWN, por sus siglas en inglés) como voltaje de entrada. Después de varias iteraciones se llegaron a las siguientes matrices:

En la Fig. 2 se puede apreciar la comparación de la predicción de desplazamiento y aceleración realizada por el modelo identificado ante una entrada de BLWN con mediciones experimentales, mientras que en la Fig. 3 se observa la verificación de que la segunda derivada de la predicción de desplazamiento tenga un error mínimo respecto a la predicción de aceleración. Aquí es importante aclarar que la predicción de desplazamiento no tiene buena concordancia con la medición experimental debido a que el objetivo es un control por aceleración, y es un hecho que para una misma aceleración no existe una solución única de desplazamiento. Además, empíricamente se observan que los ajustes realizados en la 2da fila de la matriz afectan principalmente a la predicción de desplazamiento y en forma mínima a la de aceleración, mientras que lo ocurrido con los ajustes a la tercera fila es al revés, inciden en la aceleración y no el desplazamiento. Con base en este hallazgo es como se ajustaron las entradas de interés de la matriz optimizando la predicción de aceleración y minimizando la diferencia entre la predicción de aceleración y la segunda derivada de la predicción de desplazamiento, también a partir de este hallazgo se determinó que la ecuación del tirón (tercera fila) es la principal responsable para el control de aceleración.

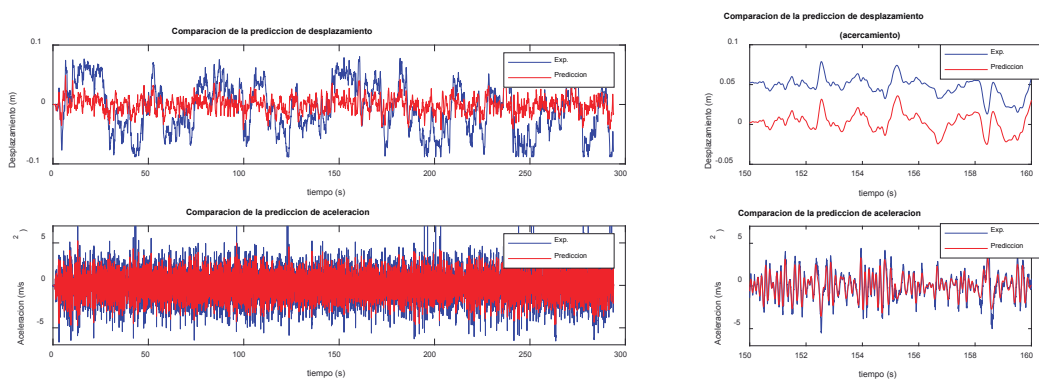
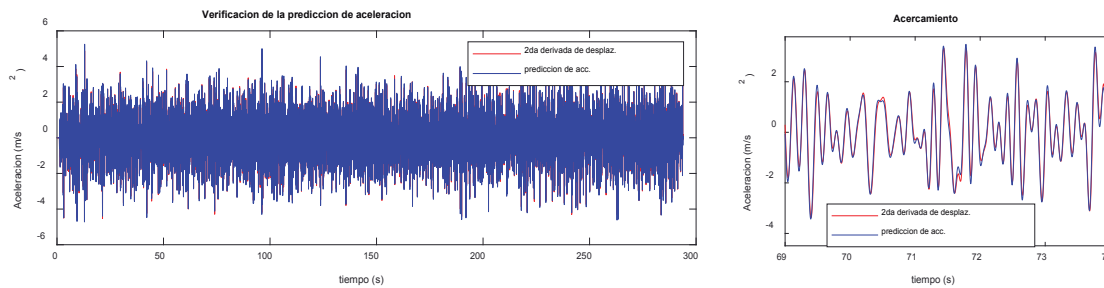
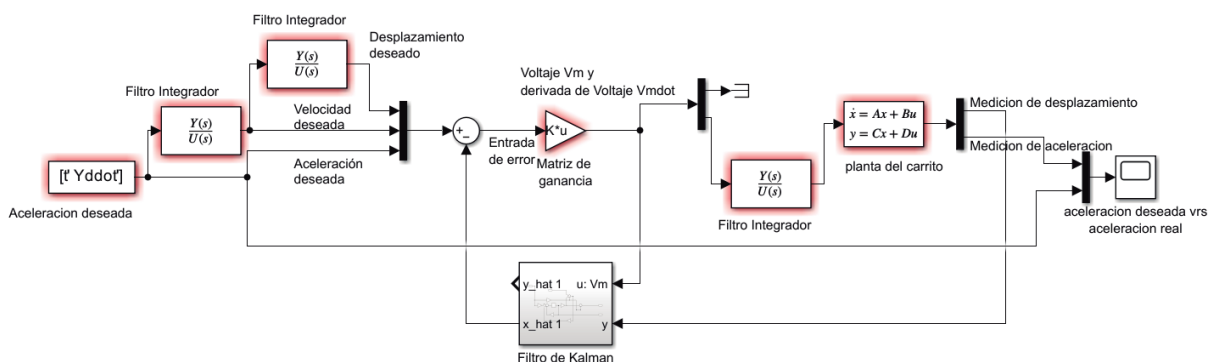


Fig. 2. Comparación entre el desplazamiento y aceleración real y la predicción del modelo.



III. DISEÑO Y VALIDACIÓN DEL CONTROLADOR POR ACELERACIÓN

Una vez identificadas las matrices requeridas del modelo de espacio de estados, se procedió a implementar el diseño de un controlador por aceleración con retroalimentación mediante el regulador lineal cuadrático (LQR) y un estimador de estados de orden completo, usando un filtro de Kalman en SIMULINK, modelo que se muestra en la Fig. 4. Lo que determina el algoritmo LQR es la matriz de ganancia en estado estacionario que multiplica el vector de error para obtener el voltaje de comando y su derivada, según el modelo de la ecuación (1), para lograr el control óptimo. A pesar de que el algoritmo LQR provee el voltaje y su derivada, el carrito únicamente puede recibir una señal de voltaje. Al comparar la derivada del voltaje con la integral de la derivada, se encontró que existía una inconsistencia entre ambas señales. Esto se debe a que a la hora de implementar el método de LQR esta condición no fue impuesta. Sin embargo, ya es conocida que la ecuación del tirón y por ende, la derivada de voltaje, tiene una relación más directa con la aceleración, por lo que se elige integrar la derivada de voltaje para obtener el voltaje que debe ser comandado en el carrito.



Asimismo, como se puede apreciar en la figura anterior, la aceleración deseada también debe integrarse 2 veces para conformar el vector de estado deseado. Tanto la integración anterior de la derivada de voltaje como esta integración es realizada por una función de transferencia (TF) diseñada de forma análoga a un filtro paso banda, de modo que se elimine las frecuencias bajas de la señal y así evitar que la línea base se desvíe continuamente. Esta TF fue construida en el dominio de Laplace, convolucionando la TF de un compensador de retraso de fase con el cuadrado de la TF

del sistema de 1 grado de libertad multiplicada por , donde es la variable compleja de Laplace. El diagrama de Bode correspondiente se muestra en la Fig. 5. Los parámetros de la TF se ajustaron de forma iterativa para minimizar su error respecto a la TF teórica. Se puede observar que la fase se mantiene casi constante (90° de retraso) para el rango de frecuencia de interés (1-8 Hz) mientras que la amplitud es bastante cercana a la función de integración teórica $1/s$, pero reduciendo al mínimo las señales con frecuencias cercanas a cero.

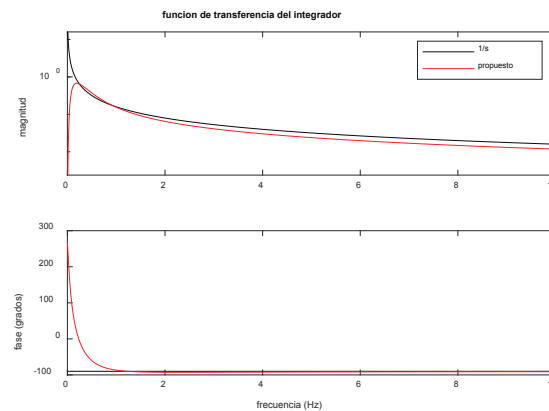


Fig. 5. Diagrama de Bode de la función de transferencia del integrador.

Por último, el controlador diseñado en SIMULINK es implementado en el control por aceleración del servomotor lineal a través del hardware de Quanser. La Fig. 6 muestra una comparación entre la aceleración deseada comandada y la aceleración medida del carrito, para una sinusoidal de prueba de 1 Hz. Se considera que la medición de aceleración es ruidosa, y se atribuye a las características del del acelerómetro. Además, la señal experimenta cierto retraso y diferencia de amplitud respecto a la comandada, como es de esperarse. Sin embargo, es estable y se estima que se reproduce el comportamiento sinusoidal de manera satisfactoria.

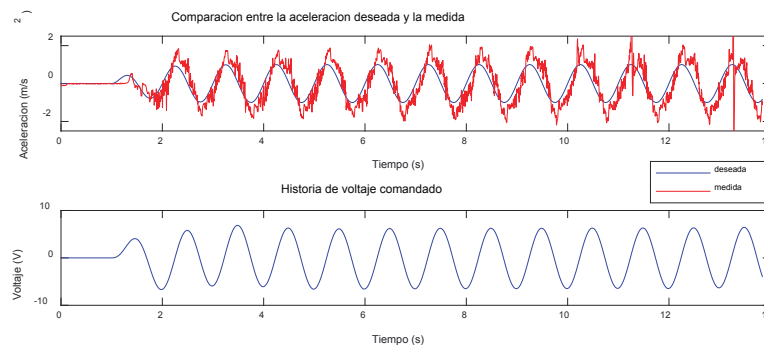


Fig. 6. Comparación entre la aceleración deseada y la medida y el voltaje comandado.

CONCLUSIONES

Se diseñó y se validó una estrategia de control por aceleración para RTHS. Se identificó un modelo “caja negra” de tercer orden y basado en tirón con el método N4SID, y se mapeó sus estados generalizados a estados físicos mediante una transformación de dos pasos. El control por realimentación de estados completos abarcando desplazamiento, velocidad y aceleración mediante el filtro de Kalman y el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) permitió un control estable de la aceleración de la masa activa respecto a la aceleración deseada.

REFERENCIAS

- [1] S. Lobo – Aguilar et al. “Diseño de compensadores de adelanto de fase para ensayos RTHS”, presentado en VI Jornadas de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, setiembre 25, 2024.
- [2] R.E. Christenson et al. “Large – Scale Experimental Verification of Semiactive Control through Real – Time Hybrid Simulation”, *Journal of Structural Engineering*, vol. 134, no. 4, pp. 522, abril, 2008.
- [3] D. Vanase III et al. “Real – Time Hybrid Substructuring using an Inertial Shaker Transfer System”, presentado en Society for Experimental Mechanics Annual Conference and Exposition XLI, Austin, Texas, Estados Unidos de América, febrero, 2023.
- [4] H. Hayati et al. “Jerk within the context of science and engineering – a systematic review”, *Vibration*, vol 3, pp. 374 – 375, diciembre, 2020, doi:10.3390/vibration3040025
- [5] M. Verhaegen, “Identification of the deterministic part of MIMO state space models given in innovations form from input-output data”, en *Automatica*, Vol. 30, No. 1, 1994, pp. 61–74. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(94\)90229-1](https://doi.org/10.1016/0005-1098(94)90229-1)
- [6] P. vanOverschee y B. DeMoor, *Subspace Identification of Linear Systems: Theory, Implementation, Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [7] R. Saco, “Subspace Identification of an Inverted Pendulum on a Cart using State Variables Transformation”, en IFAC-Papers On Line, January 2019, 52(11):244-249

Dilución de materiales de referencia certificados para la producción de patrones sólidos en espectrometría de fluorescencia de rayos X

Dilution of certified reference materials to produce solid standards in X-ray fluorescence spectrometry

Paula Solano Sánchez

Investigadora, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: paula.solano@ucr.ac.cr

Isabela De Sainz Molestina

Investigadora, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: isabela.desainz@ucr.ac.cr

María Paula Macklin Soto

Investigadora, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: maria.macklin@ucr.ac.cr

Johanna Méndez Arias

Investigadora, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: johanna.mendezarias@ucr.ac.cr

Lautaro Ramírez Varas

Docente e Investigador, Escuela de Ingeniería Química, UCR

e-mail: lautaro.ramirezvaras@ucr.ac.cr

Juan Antonio Guardado Pérez

Coordinador Científico, Centro Nacional de Metrología de México (CENAM)

e-mail: jguardad@cenam.mx

Palabras clave:

Análisis elemental, dilución, materiales de referencia certificados, polvos prensados, XRF.

Keywords:

Certified reference materials, dilution, elemental analysis, pressed powders, X-ray fluorescence.

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio preliminar de un método alternativo para la construcción de curvas de calibración en espectrometría de fluorescencia de rayos X, a partir de patrones de calibración preparados por dilución gravimétrica de Materiales de Referencia Certificados (MRC) y corresponde a los resultados de un estudio preliminar. Se utilizaron dos materiales de referencia certificados por centros de metrología reconocidos. A partir de estos dos MRC se prepararon diez patrones de calibración, cinco por cada MRC, y se

analizaron doce elementos representativos. Los resultados iniciales demuestran que la metodología propuesta es válida y confiable, por lo que es relevante ampliar el estudio e incorporar la evaluación de correcciones por efecto matriz a los cálculos del desempeño.

ABSTRACT

This paper presents an alternative approach to constructing calibration curves in X-ray fluorescence spectrometry using calibration standards. These standards were prepared by gravimetric dilution of Certified Reference Materials (CRM). Two CRM certified by recognized metrology institutes were used to prepare ten calibration standards, five from each material. Twelve representative elements were analyzed. The preliminary results indicate that the proposed methodology is valid and reliable, supporting further studies that include matrix effect correction in performance evaluation

I. INTRODUCCIÓN

La identificación y cuantificación de elementos químicos en muestras líquidas y sólidas es un tema de gran interés en muchos campos científicos y productivos debido a su impacto. Los análisis se aplican, por ejemplo, en la detección de elementos potencialmente tóxicos en juguetes plásticos [1], contribuyendo a la protección de la salud infantil; en la industria farmacéutica, para identificar impurezas elementales que podrían representar un riesgo para el paciente [2]; en el ámbito ambiental, para el estudio de suelos, sedimentos, vegetación, partículas atmosféricas, aguas y residuos sólidos, facilitando la evaluación de la contaminación, calidad del aire, fertilidad del suelo y trazabilidad de metales en diversos entornos [3]; en metrología, para el desarrollo de materiales de referencia que facilitan el análisis elemental que permiten brindar la trazabilidad de las mediciones y asegurar la calidad de las mediciones [4], [5].

Hoy en día existe una amplia gama de técnicas analíticas para análisis elemental, entre ellas la espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés) [6]. Esta técnica ofrece múltiples ventajas, entre ellas destaca su capacidad para abarcar un amplio rango elemental y de realizar análisis no destructivos, así como su rapidez para obtener resultados analíticos multielementales y su versatilidad. Estas ventajas la posicionan como una técnica valiosa para diversas aplicaciones, incluyendo el desarrollo metrológico; no obstante, cuando se buscan resultados confiables, es esencial asegurar la trazabilidad metrológica, mediante el uso adecuado de materiales de referencia certificados (MRC) y la precisión de las mediciones con XRF, utilizando procedimientos de preparación de muestras y de medición robustos [3].

El potencial analítico de la XRF se deriva de su principio de medición. La técnica identifica y cuantifica los elementos químicos presentes en una muestra por medio de las señales de rayos X característicos emitidos por los elementos en virtud de sus transiciones electrónicas [7]. Claro está que para relacionar una señal de rayos X, tanto en intensidad como en energía, para un elemento dado, se requiere un patrón para ese elemento. Los patrones para mediciones de composición química son generalmente materiales de referencia con composición química certificada mediante técnicas y por organismos reconocidos.

Los MRC se preparan en una variedad de combinaciones analito-matriz de modo que la caracterización del analito se realiza en condiciones controladas y que simulen lo más fielmente las condiciones reales de uso. Existe una creciente demanda de MRC y un desafío para la metrología química, ya que se requiere el desarrollo de MRC con la menor incertidumbre y que aborden un gran número de aplicaciones que son necesarias en los diferentes sectores de la economía, la salud y el ambiente [8].

En la espectroscopía XRF se utilizan los patrones de calibración para establecer una relación entre la señal espectral y la concentración del analito, mediante curvas de calibración, garantizando la precisión y la reproducibilidad en la cuantificación de elementos traza y metales pesados. Existen diferentes estrategias de preparación de patrones para análisis de muestras sólidas, siendo una de las más utilizadas los polvos o pastillas prensadas. Estas se elaboran a partir del material en polvo, solo o con la adición de algún aglutinante (como cera, ácido bórico, celulosa) y se prensan a alta presión para formar un disco con un espesor definido por la cantidad de material y el diámetro de este.

Se encuentran estudios realizados en diversas matrices, tales como suelos [9], rocas [10], arcillas [11], vegetales [12], arroz [13], café [14], óxido de titanio [15], plantas medicinales [16], suplementos para animales [17] en donde los patrones para análisis de muestras sólidas se prepararon en forma de pastillas prensadas. Como muestran [16] y [18], se emplean MRCs para preparar los patrones, siendo que cada material de referencia corresponde a un valor de la curva, lo que implica contar con un mínimo de tres MRCs. Esto es posible siempre que se disponga en el mercado de MRCs con la combinación analito-matriz requerida.

Cuando no hay MRCs disponibles, se acuden a otras formas de obtener el valor de referencia. Por ejemplo, en [9] y [17] utilizaron sustancias puras, como elementos puros y óxidos metálicos; sin embargo, hay que tener en cuenta que el uso de estas sustancias puede generar un efecto de matriz que debe tenerse en consideración. En [10] y [12] optaron por utilizar soluciones estándar líquidas para ICP-MS impregnadas en una matriz sólida afín a la matriz de análisis, y posterior a la mezcla el material es medido en un ICP-MS para confirmar las concentraciones. Finalmente, en [14] se utiliza como patrón un material que es caracterizado previamente utilizando otra técnica analítica, como ICP-OES, permitiendo minimizar los efectos de la matriz. Utilizar estas dos últimas metodologías implica que el laboratorio debe disponer de al menos 2 técnicas analíticas: XRF y una técnica alternativa para caracterizar el material del patrón. Otra dificultad del uso de estas metodologías es que, en algunos casos, no se calcula la incertidumbre de los patrones de calibración preparados.

Debido a la limitada disponibilidad de MRCs y considerando que los MRCs comercialmente disponibles se producen bajo estrictos estándares metrológicos, este trabajo propone la preparación de patrones y construcción de curvas de calibración en forma de pastilla prensada mediante la dilución gravimétrica de MRCs en polvo. Estos materiales están destinados a ser utilizados en análisis cuantitativos por espectrometría de fluorescencia de rayos X, garantizando así la trazabilidad necesaria para una medición confiable.

II. METODOLOGÍA

El presente trabajo forma parte de una colaboración entre la Universidad de Costa Rica y el Centro Nacional de Metrología de México (CENAM) cuyo interés se centra en el desarrollo de materiales de referencia como patrones de calibración para el análisis elemental de muestras complejas mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X. El presente estudio representa el primer avance del trabajo en colaboración mencionado, para lo cual se utilizaron los siguientes equipos e insumos:

1) un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda (WDXRF, por sus siglas en inglés), marca Bruker, modelo S8 Tiger [19], equipado con los cristales PET y LiF200. Para la producción de las pastillas prensadas se utilizó una micro balanza Mettler Toledo, con resolución de 1 µg, y una prensa hidráulica, marca TMAXCN., que forma parte de la infraestructura tecnológica de la Universidad de Costa Rica; un espectrómetro WDXRF, marca Panalytical, modelo Axios, equipado con cristales PET, LiF, Ge y PX, que forma parte de la infraestructura tecnológica del CENAM (México);

2) los MRCs utilizados para la construcción de las curvas de calibración fueron el SRM2711a, suelo de Montana II, del National Institute of Standards and Technology (NIST) y el DMR534a, cemento portland compuesto II, del CENAM (México). También se utilizó el DMR468a cemento portland compuesto, de este mismo centro para la evaluación de desempeño de las curvas de cemento. El material utilizado como aglutinante fue LICOWAX C MICROP PM, aditivo a base de ceras producido por la empresa Clariant.

Para la preparación de cada patrón de las curvas de calibración, así como para el patrón utilizado para la evaluación del desempeño; se determinó la masa del MRC y del aglutinante utilizado para producir cada pastilla prensada, utilizando una micro balanza. Luego el material se prensó utilizando la prensa hidráulica, a una presión de 207 MPa en un tiempo de 60 s, utilizando un dado de 35 mm. Se realizó la medición de cada elemento en cada uno de los puntos de la curva de calibración para cada patrón. Se obtuvo la intensidad neta para cada elemento, la cual utilizando el software del equipo se corrigió para compensar los efectos de fluorescencia secundaria entre elementos y de superposición de líneas. Posteriormente se realiza una regresión lineal entre las intensidades corregidas y las concentraciones elementales de cada patrón. La cual se evaluó utilizando parámetros como linealidad por medio del (coeficiente de determinación) y veracidad por medio del (error normalizado).

El error normalizado se calculó mediante la ecuación (1).

$$En = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

donde X_{lab} es la concentración obtenida con las curvas de calibración bajo estudio, X_{ref} el valor de referencia, U_{lab} es la incertidumbre asociada a la concentración obtenida con las curvas del estudio y U_{ref} es la incertidumbre del material de referencia reportada en el certificado del MRC.

Para el cálculo de la incertidumbre de las concentraciones elementales se utilizó la metodología planeada en la Guía para la expresión de la incertidumbre, GUM [20].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La baja disponibilidad de MRCs limita el desarrollo de la espectrometría de fluorescencia de rayos X como técnica analítica, siendo la construcción de curvas de calibración a partir de varios MRCs con matrices similares una tarea compleja que, además, encarece las mediciones cuantitativas. La preparación de patrones de calibración, a partir de MRCs, por medio de dilución gravimétrica, se propone como medio para superar esta limitación y ofrece una solución más económica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos al implementar esta metodología.

En la figura 1 se presentan las curvas de calibración obtenidas para la determinación de 6 elementos mayoritarios de la matriz de cemento. Los coeficientes de determinación (R^2) indican un buen ajuste en la regresión lineal para el sodio (0.9918) magnesio (0.9887), aluminio (0.9901) y silicio (0.9883). Sin embargo, los valores obtenidos para el calcio (0.9385) y potasio (0.9579) reflejan un ajuste menos satisfactorio, lo que sugiere una menor capacidad predictiva de estas curvas para la determinación de estos elementos.

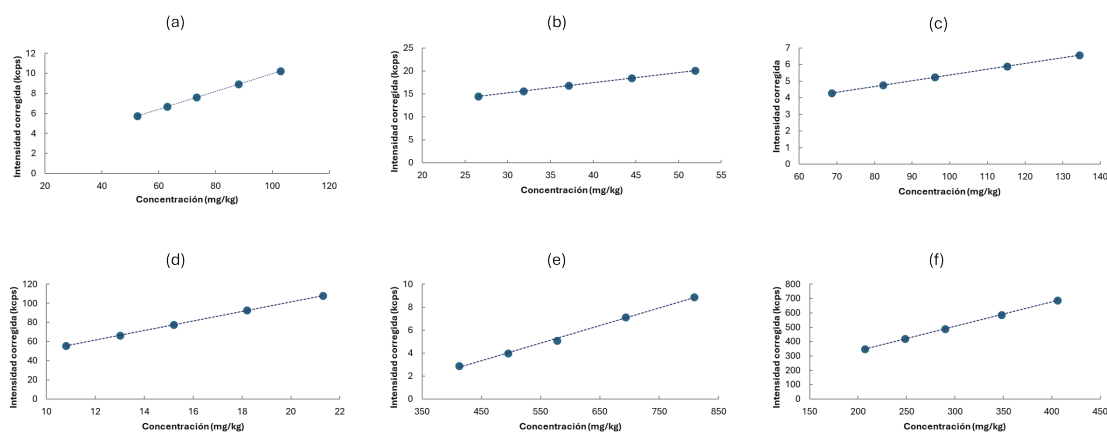


Fig. 1. Curvas de calibración para el cemento portland compuesto.

El ajuste lineal de las curvas de calibración obtenidas para la determinación de los 6 elementos traza analizados en la matriz de suelo es satisfactorio, como se observa en la figura 2, con valores de R^2 de para 0.9999 para el arsénico, 0.9999 para el cadmio, 0.9999 para el cobre, 0.9999 para níquel, 0.9972 para el fósforo y 0.9999 para el zinc.

La evaluación de desempeño de las curvas de calibración desarrolladas para ambas matrices muestra resultados satisfactorios para la mayoría de los elementos analizados. Como se observa en el cuadro 1, los errores normalizados se encuentran dentro del intervalo de aceptación en todos los elementos excepto para el calcio, cobre y fósforo, cuyo valor excede 1.

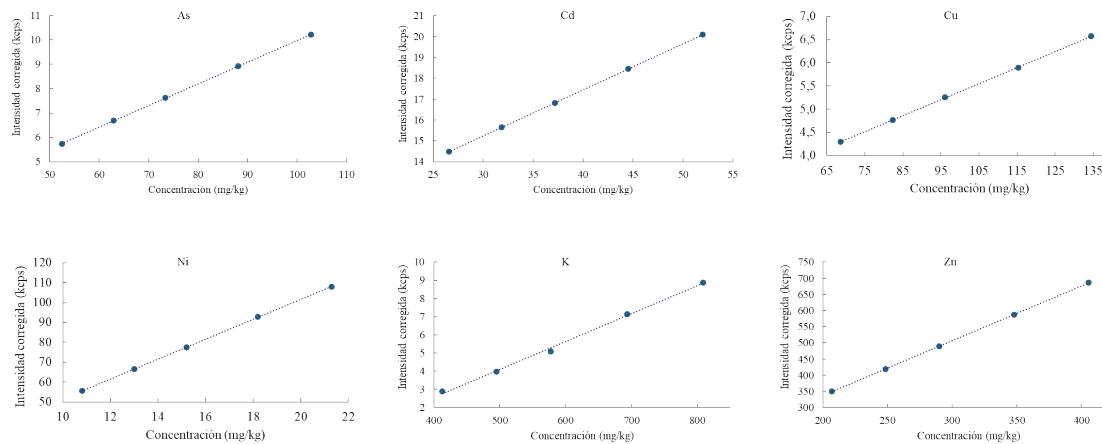


Fig. 2. Curvas de calibración para el suelo de Montana II: (a) arsénico; (b) cadmio; (c) cobre; (d) níquel; (e) fósforo; (f) zinc.

CUADRO I DESEMPEÑO DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN CONSTRUIDAS CON MRC DILUIDOS

Elemento	Na	Mg	Al	Si	Ca	K	Cd	As	Cu	Ni	F	Zn
	-0.65	-0.26	0.20	0.32	1.26	0.19	0.52	0.03	1.46	0.003	1.23	0.17

Esto confirma la habilidad de las curvas para la cuantificación de nueve de los doce elementos. Para el caso del calcio, el cobre y el fósforo se puede atribuir el resultado no satisfactorio a los efectos de absorción y mejora, así como a la naturaleza de la pastilla por la combinación de factores como la variación de densidad de los gránulos de polvo en función del tamaño de partícula, la carga de compactación recibida, entre otros. Esto conlleva a continuar con estudios de corrección por efecto de matriz y caracterización de los patrones utilizando herramientas de los XRF, como el Mapping, o microscopios.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de este estudio preliminar demuestran que la metodología para la preparación de patrones de calibración, a partir de materiales de referencia certificados, por medio de dilución gravimétrica, como medio para superar la limitada disponibilidad de materiales de referencia para su aplicación en la técnica de XRF, es satisfactoria, incluso muy buena, desde el punto de vista analítico-metrológico. En vista de que este es un estudio inicial, es necesario aumentar el número de muestras, así como evaluar correcciones por efectos matriz para asegurar un desempeño satisfactorio en todos los elementos.

Se observa alta correlación del ajuste por mínimos cuadrados de las curvas de calibración de sodio, magnesio, aluminio, silicio, arsénico, cadmio, cobre, níquel, fósforo y zinc, lo cual es un indicador de la buena relación entre la concentración y la respuesta instrumental de XRF para cada elemento de interés.

Se obtienen errores normalizados dentro de los límites establecidos por los criterios de aceptación para sodio, magnesio, aluminio, silicio, potasio, arsénico, cadmio, níquel y zinc, lo que confirma la validez y confiabilidad de la metodología propuesta.

REFERENCIAS

- [1] D. V. L. Ávila, S. O. Souza, J. B. Pereira Junior, V. Cerdà, and R. G. O. Araujo, "Multivariate optimization for the development of a sample preparation procedure and evaluation of trace elements in plastic toys," *Journal of Trace Elements and Minerals*, vol. 12, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jtemin.2025.100226.
- [2] A. C. M. Aleluia, M. de S. Nascimento, A. M. P. dos Santos, W. N. L. dos Santos, A. de Freitas Santos Júnior, and S. L. C. Ferreira, "Analytical approach of elemental impurities in pharmaceutical products: A worldwide review," Jul. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.sab.2023.106689.
- [3] E. Marguá, I. Queralt, and E. de Almeida, "X-ray fluorescence spectrometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation, applications and recent trends," Sep. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135006.
- [4] D. A. Ahumada-Forigua, L. L. Soto-Morales, L. V. Morales-Erazo, and J. P. Abella-Gamba, "Development of a certified reference material for elemental analysis of drinking water," *Revista Colombiana de Química*, vol. 48, no. 3, 2019, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v48n3.78660.
- [5] J. W. Lee, M. C. Lim, Y. Lim, G. B. Tegegn, and K. S. Lee, "Development of a coffee bean certified reference material (KRISS CRM 108-10-023) for elemental analysis," *Anal Bioanal Chem*, vol. 416, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s00216-023-05051-5.
- [6] E. Marguá and R. Van Grieken, "Analytical Instrumentation." [Online]. Available: www.perkinelmer.com
- [7] L. A. Pérez Díaz, J. Serna Saiz, and H. Torres Quezada, "Solid sample preparation for X-ray fluorescence analysis: a review," *Revista Colombiana de Química*, vol. 52, no. 3, pp. 21–40, Sep. 2023, doi: 10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.111499.
- [8] M. A. Leiva-Guzmán, "MATERIALES DE REFERENCIA Y COMPARACIONES INTERLABORATORIOS." [Online]. Available: <http://www.cenma.cl>
- [9] S. Ichikawa and T. Nakamura, "Solid Sample Preparations and Applications for X-Ray Fluorescence Analysis," in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, Wiley, 2016, pp. 1–22. doi: 10.1002/9780470027318.a9562.
- [10] M. G. Śliwiński *et al.*, "Making low concentration in-house pressed pellet trace element standards for carbonate rock analyses by WD-XRF," *Chem Geol*, vol. 298–299, pp. 97–115, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.12.027.
- [11] N. Mijatović, M. Vasić, L. Miličić, M. Radomirović, and Z. Radojević, "Fired pressed pellet as a sample preparation technique of choice for an energy dispersive X-ray fluorescence analysis of raw clays," *Talanta*, vol. 252, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.talanta.2022.123844.
- [12] H. L. Byers, L. J. McHenry, and T. J. Grundl, "XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits," *Food Chem X*, vol. 1, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.fochx.2018.100001.
- [13] T. Inui, Y. Koike, and T. Nakamura, "Preparation of cadmium-containing brown rice grains as calibration standards for X-ray fluorescence analysis of cadmium in rice grains," *X-Ray Spectrometry*, vol. 43, no. 2, pp. 112–117, 2014, doi: 10.1002/xrs.2524.

- [14] M. Weinberger *et al.*, “Critical evaluation of energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry for multielemental analysis of coffee samples: Sample preparation, quantification and chemometric approaches,” *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*, vol. 215, May 2024, doi: 10.1016/j.sab.2024.106898.
- [15] M. F. Gazulla, M. Orduña, and M. Rodrigo, “Determination of trace elements in titanium oxides by wavelength dispersive x-ray fluorescence spectrometry (WD-XRF),” *X-Ray Spectrometry*, Jan. 2024, doi: 10.1002/xrs.3418.
- [16] C. Kulal, R. Kumar Padhi, K. Venkatraj, K. Kantha Satpathy, and S. Hiriyuru Mallaya, “Study on Trace Elements Concentration in Medicinal Plants Using EDXRF Technique,” 2011, doi: 10.1007/s12011-020-02037-7/Published.
- [17] D. V. Babos, V. C. Costa, and E. R. Pereira-Filho, “Wavelength dispersive X-ray fluorescence (WD-XRF) applied to speciation of sulphur in mineral supplement for cattle: Evaluation of the chemical and matrix effects,” *Microchemical Journal*, vol. 147, pp. 628–634, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.microc.2019.03.077.
- [18] Y. Fiamegos and M. B. de la Calle Guntiñas, “Validation strategy for an ed-xrf method to determine trace elements in a wide range of organic and inorganic matrices based on fulfilment of performance criteria,” *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*, vol. 150, pp. 59–66, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.sab.2018.10.009.
- [19] Bruker, “S8 TIGER – Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WDXRF) Spectrometer,” Bruker.
- [20] “Evaluación de datos de medición Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida 2 2 B A k +,” 2008.

Método eléctrico y análisis mineralógico para identificar la saturación crítica en agregados finos

Electrical method and mineralogical analysis to identify the critical saturation in fine aggregates

Rafael Ernesto Villegas Villegas

Investigador Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)

e-mail: rafael.villegas@ucr.ac.cr

Fabián Elizondo Arrieta

Investigador Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME)

e-mail: fabian.elizondo@ucr.ac.cr.

Palabras clave:

Agregados finos, Conductividad, Mezclas asfálticas, Mineralogía, Morfología de agregados.

Keywords:

Aggregate morphology, Asphalt mixtures, Conductivity, Fine aggregates, Mineralogy.

RESUMEN

Se desarrolló un sistema y una metodología basados en la conductividad eléctrica para determinar la condición de superficie saturada seca (SSD) en agregados finos que pasan a través de una malla de 200. El sistema permite medir la absorción desde el estado seco con alta precisión, superando la subjetividad de métodos como la norma ASTM C128. Se realizaron ensayos en agregados calcáreos e ígneos, complementados con microscopía electrónica de barrido (SEM), análisis termogravimétrico (TGA) y difracción de rayos X (XRD), técnicas que revelan la morfología, el contenido de humedad y la estructura mineralógica, respectivamente. Esta metodología permite una estimación más precisa del contenido efectivo de asfalto en mezclas asfálticas, lo cual es crucial para controlar la cohesión interna, minimizar los vacíos y mejorar la resistencia a la fatiga bajo cargas repetidas, optimizando así el desempeño estructural del pavimento.

ABSTRACT

An electrical conductivity-based device and methodology were developed to determine the saturated surface dry (SSD) condition of fine aggregates passing a 200 sieve. The system allows accurate measurement of moisture uptake from the dry state, overcoming the subjectivity of standard methods such as ASTM C128. Tests were performed on calcareous and igneous aggregates, complemented by scanning electron microscopy (SEM), thermogravimetric analysis (TGA), and X-ray diffraction (XRD), providing information on morphology, moisture content, and mineral structure, respectively. This methodology allows a more accurate estimation of the effective asphalt content in asphalt mixtures, which is critical to ensure internal

cohesion, minimize voids, and improve fatigue resistance under repeated loading, thus optimizing the structural performance of the pavement.

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas de los agregados, en particular la gravedad específica bruta (GBS) y la absorción, son clave para el diseño volumétrico de mezclas asfálticas, ya que influyen en parámetros como el contenido efectivo de asfalto y la relación polvo-asfalto. En Costa Rica, la norma INTE C69:2016, basada en la norma ASTM C128-15 [1], regula su determinación, pero presenta limitaciones para las fracciones finas con alto contenido que pasan por el tamiz de 200, que tienden a sobreestimar la absorción y subestimar el GBS como muestran [2], [3]. Esta inexactitud compromete la estimación del asfalto efectivo, afectando la durabilidad del pavimento.

Un punto crítico es la determinación de la condición de superficie saturada seca (SSD), que en métodos tradicionales como ASTM C128 y AASHTO T84 depende de la observación visual, lo que introduce incertidumbre en materiales finos [4]. Ante esto, se han propuesto métodos basados en la conductividad eléctrica como una alternativa objetiva y repetible, donde la resistividad disminuye con el aumento de la humedad hasta alcanzar el SSD [5], [6]. Kim et al. [5] emplearon celdas prismáticas según ASTM G187 y TM 5-811-7, mientras que Sosa et al. [6] aplicaron una celda “U” con cuatro electrodos calibrados con KCl. En contraste, el método propuesto aquí utiliza una celda optimizada para solo 70 g de muestra y un enfoque de titulación del estado seco al húmedo, reduciendo el tiempo sin perder sensibilidad.

Dada la alta presencia de rellenos minerales en las mezclas costarricenses, este procedimiento puede mejorar la selección de agregados, reducir el consumo de asfalto y optimizar el desempeño mecánico. Aunque aún se encuentra en fase de validación, los resultados iniciales indican un potencial técnico significativo para superar las limitaciones actuales y mejorar la caracterización de agregados finos en mezclas asfálticas.

La aplicación de este método eléctrico cobra especial relevancia para las condiciones de los materiales predominantes en Costa Rica, donde las mezclas asfálticas presentan un alto contenido de relleno mineral. Un procedimiento más preciso para determinar el SSD y la absorción contribuiría a seleccionar materiales con mejores propiedades, reducir el uso excesivo de asfalto y mejorar el rendimiento mecánico de las mezclas y la sostenibilidad en proyectos de infraestructura vial.

II. METODOLOGÍA

Se evaluó la conductividad eléctrica de agregados calizos finos e ígneos fraccionados pasando malla la N°200 bajo diferentes condiciones de saturación, absorción y compactación. Se utilizó una celda de conductividad con electrodos, un sistema de compactación estandarizado y equipos auxiliares como microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis termogravimétrico (TGA).

Las muestras se homogeneizaron durante la medición de masa y compactación, y se aplicó un protocolo de humectación progresiva desde el estado seco. Se realizaron mediciones de

conductividad a diferentes tiempos de saturación (1-24 h) para construir curvas de absorción por tipo de agregado. La reproducibilidad se analizó mediante réplicas de la prueba. El SEM y el análisis elemental caracterizaron la morfología y la composición superficial, y el TGA validó el contenido de agua alcanzado en cada etapa.

III. RESULTADOS

A. Diseño de equipo

Para llevar a cabo las mediciones de conductividad eléctrica en agregados finos, fue necesario diseñar una celda que permitiera contener una masa representativa de muestra, manteniendo al mismo tiempo un tamaño eficiente y condiciones controladas de contacto eléctrico. La celda debía facilitar el paso de corriente a través del material y permitir la medición precisa del voltaje inducido.

Con este fin, se implementó un sistema de cuatro electrodos internos, configurados para realizar mediciones según el método clásico de potencial controlado. Dos de los electrodos fueron conectados directamente a una fuente de alimentación de corriente alterna de 12 V, mientras que los otros dos se vincularon a un multímetro digital de alta sensibilidad para registrar la caída de voltaje. Esta disposición permitió aislar la medición de voltaje de la resistencia de contacto entre los electrodos y la muestra. En la Fig. 1 se muestra el equipo diseñado.

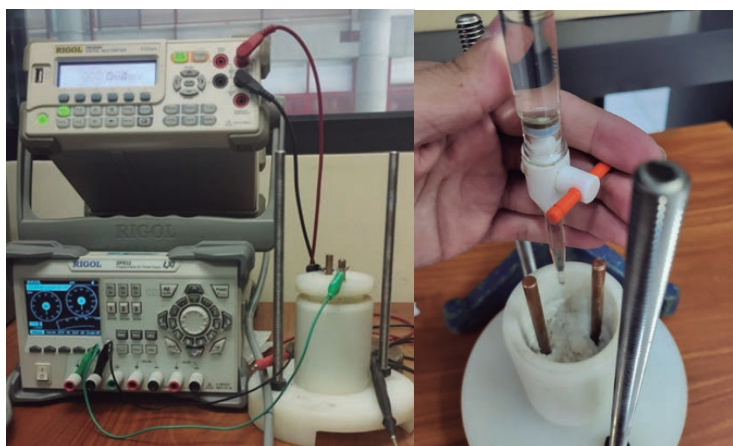


Fig. 1. Equipo y método de valoración analítica con bureta de seco a húmedo para SSD.

Para mejorar la precisión de las mediciones de conductividad eléctrica en áridos finos, se desarrolló una celda de carga continua que permite la densificación homogénea de una muestra optimizada de 70 g. Esta configuración reduce los vacíos y favorece la estabilidad de las vías eléctricas, especialmente en áridos con minerales conductores. También se implementó un método de titulación analítica química disruptiva mediante bureta, en el que se añade agua gradualmente desde el estado seco hasta alcanzar la condición de superficie saturada seca (SSD), lo que mejora el control

del proceso de absorción en comparación con los métodos convencionales de inmersión prolongada. Durante las pruebas, se aplicaron medidas de sellado para evitar pérdidas por evaporación y se monitoreó la conductividad a intervalos de entre 15 minutos y 24 horas para supervisar la estabilidad en la absorción de los áridos.

B. Medición de la condición SSD en agregados calizos e ígneos que pasan la malla N°200

El análisis de la relación entre la conductividad y la absorción en materiales finos revela un comportamiento bifásico: una suave pendiente inicial, seguida de un pronunciado aumento. Esta transición marca el punto de superficie seca saturada (SDS), donde los poros del material se llenan de agua, pero no hay humedad superficial libre.

Las dos curvas ajustadas representan los regímenes de conductividad antes y después del cambio en la estructura de conducción del sistema. La primera curva (pendiente baja) corresponde al estado de baja conectividad iónica, mientras que la segunda (pendiente alta) refleja una mayor continuidad en las vías eléctricas a medida que el agregado se satura. Mediante la transformación logarítmica de ambas funciones exponenciales, se obtiene una representación lineal que permite la identificación precisa del punto de intersección, cuyo valor en x corresponde al porcentaje de absorción en condiciones SDS, como se muestra en la Fig. 2.

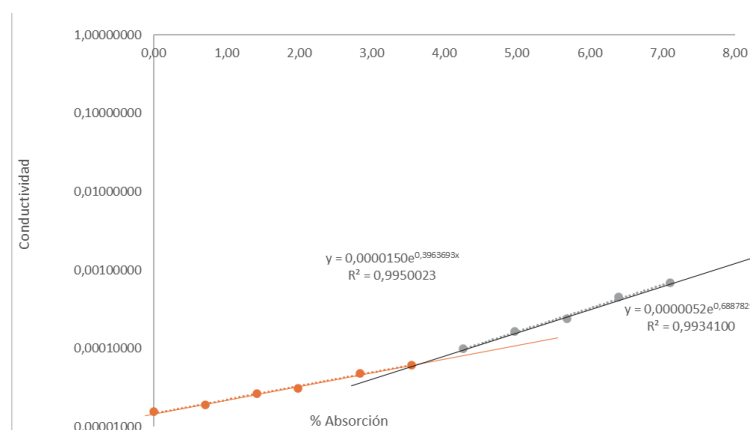


Fig. 2. Curva de conductividad vs porcentaje de agua absorbido agregado calizo.

El CUADRO I resume las mediciones de conductividad y absorción del material pasante por la malla N°200 para agregados calizos e ígneos. El método propuesto demuestra buena repetibilidad y sensibilidad al tipo de agregado. Como se muestra, los bajos coeficientes de variación y las diferencias de media entre materiales confirman su capacidad para detectar variaciones en el comportamiento higroscópico según la naturaleza del material.

CUADRO I
RESÚMEN ESTADÍSTICO PARA LAS REPILICAS DE AGREGADO CALIZO Y SILÍFICO

Tipo de agregado	Calizo	Silíceo
Media (SSD)	3,89	9,39
<i>Desviación estándar (SSD)</i>	0,18	0,49
Coefficiente de Variación (CV)	4,56%	5,19%

C. Análisis Morfológico mediante SEM

La microscopía electrónica de barrido (SEM) es una herramienta fundamental en la caracterización avanzada de materiales, incluyendo los áridos finos utilizados en ingeniería civil. Este método permite obtener imágenes de alta resolución de las superficies de las partículas, revelando detalles microestructurales y morfológicos que no son visibles con las técnicas convencionales. En el caso de los áridos finos, la SEM facilita la identificación de porosidad, microfisuras y texturas superficiales, propiedades estrechamente relacionadas con la capacidad de absorción de agua, como se muestra en la Fig. 3.

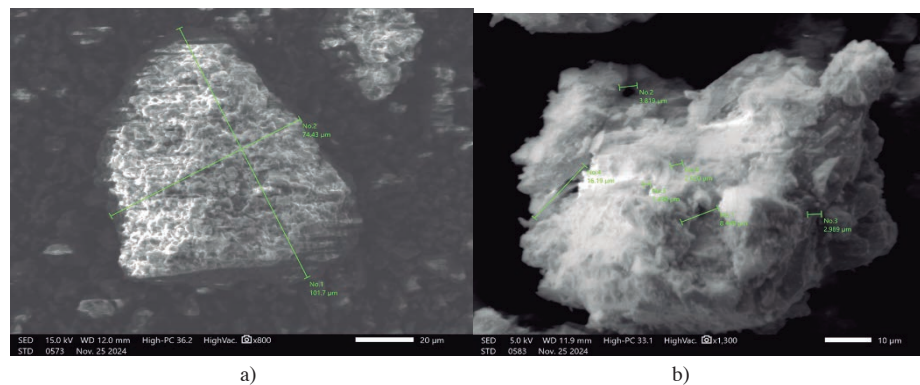


Fig. 3. Imágenes SEM de agregado a) silíceo y b) calizo.

D. Análisis Morfológico mediante SEM

Para complementar la caracterización morfológica, se realizó un análisis de difracción de rayos X (DRX) con el objetivo de confirmar la naturaleza mineralógica de los agregados finos estudiados. Esta técnica permitió identificar las fases cristalinas presentes en los materiales, aportando información clave sobre su composición y estructura interna. Los difractogramas obtenidos se presentan en la Fig. 4, donde se muestran los perfiles correspondientes a los agregados calizos e ígneos utilizados en los ensayos.

En el caso del agregado de caliza, los difractogramas obtenidos muestran picos definidos que corresponden a los planos cristalográficos característicos de la calcita (CaCO_3), lo que confirma que este es el principal componente mineralógico de la muestra. Además, se identificaron picos secundarios de menor intensidad que podrían estar asociados a la presencia de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$),

un mineral frecuente en mezclas de caliza. La intensidad relativamente baja de estos picos sugiere que, de estar presente, la dolomita constituye una fase secundaria dentro del material analizado.

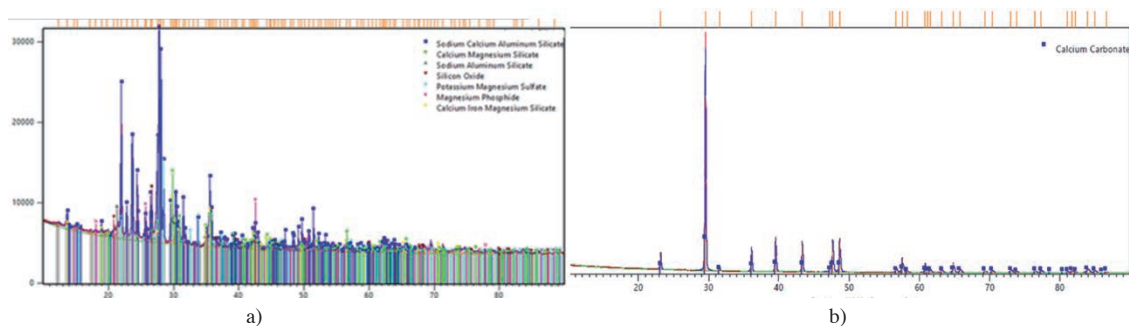


Fig. 4. Difractogramas de agregado a) sílcico y b) calizo.

Para el agregado ígneo, el análisis de difracción de rayos X identificó la composición mineralógica predominante, revelando una mezcla compleja de silicatos y minerales accesorios. Esta caracterización es esencial para comprender el comportamiento físico y eléctrico del material en los ensayos realizados.

El mineral predominante es la plagioclasa, asociada a una matriz andesítica, con un contenido del 72,2%, lo que indica una base de silicato típica de rocas volcánicas intermedias. Le sigue el dióxido de piroxeno con un 15,1%, mientras que el cuarzo representa el 4,6% del total. También se detectó langbeinita con un 3,2% y augita, otro tipo de piroxeno, con un 1,2%.

E. Análisis TGA

Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) en una muestra de agregado ígneo con una absorción del 9,5 %, determinada mediante el método eléctrico de superficie saturada y seca (SSD), para validar la precisión de esta técnica. El TGA registró una pérdida de masa del 9,60 %, lo que confirma la consistencia entre ambos métodos. La ligera diferencia del 0,10 % sugiere que cada técnica puede capturar diferentes tipos de agua (superficial y estructural), lo que respalda la fiabilidad del método eléctrico para determinar el contenido de humedad.

CONCLUSIONES

El método desarrollado para determinar la condición de superficie saturada seca (SSD) mediante conductividad eléctrica demostró ser preciso, repetible y sensible a las características del material. Al aplicarse a caliza y agregados ígneos finos que pasaban por un tamiz de malla 200, se identificaron claras diferencias en el comportamiento de absorción. Los resultados revelaron que los finos ígneos no corresponden a sílice pura (SiO_2), como se suponía tradicionalmente, sino que presentan una composición más compleja con la presencia de plagioclasa y silicatos de calcio y magnesio.

Esta variabilidad mineralógica explica el comportamiento diferenciado observado en las pruebas de absorción y conductividad.

Se concluye que la metodología propuesta, al integrar variables como la compactación uniforme, el control de la humedad y los tiempos de saturación reduce la incertidumbre experimental y permite una caracterización más fiable de los agregados finos. Se recomienda extender su aplicación a otros tipos de agregados, incluidos los agregados reciclados, y utilizar técnicas complementarias como XRD, SEM y TGA para comprender mejor la relación entre las propiedades microestructurales y el comportamiento eléctrico, contribuyendo así a una mejor selección y control de materiales en aplicaciones de pavimentación.

AGRADECIMIENTOS

Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA).

REFERENCIAS

- [1] ASTM, ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, [s.f.].
- [2] R. Hajja, M. Mamlouk, and C. Zapata, "Evaluation of voids in mineral aggregate for HMA," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 10, pp. 1241–1249, Oct. 2012.
- [3] J. Zaniewski and D. Enke, *Materials for Civil and Construction Engineers*, 3rd ed., Pearson, 2012.
- [4] W. Duan, X. Wang, and Y. Zhang, "Novel methods for SSD determination in fine aggregates using IR radiation and thermal imaging," *J. Test. Eval.*, vol. 50, no. 4, pp. 2821–2833, Jul. 2022.
- [5] Y. R. Kim, H. J. Lee, and D. W. Park, "Determination of SSD condition of mineral fillers using resistivity-based methods," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 539–547, Dec. 2017.
- [6] E. Sosa, J. Salgado, and L. Aguilar, "Evaluación de la absorción máxima de agregados reciclados por conductividad eléctrica," *Rev. Ing. Civ. Ambient.*, vol. 12, no. 3, pp. 215–223, 2018.

Prefactibilidad de un laboratorio del fuego que permita expandir los servicios del LAPCI

Prefeasibility Study of a Fire Testing Laboratory to Expand the Services of the LAPCI

Jhymer Rojas Vásquez

Docente, Escuela de Ingeniería Mecánica

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

Palabras clave:

Fuego, laboratorio, materiales, prefactibilidad, propagación.

Keywords:

Fire, laboratory, materials, prefeasability, propagation.

RESUMEN

El Laboratorio de Protección Contra Incendios (LAPCI) de la Universidad de Costa Rica ha permitido realizar investigación principalmente enfocada en materiales de construcción, permitiendo garantizar la seguridad en hogares y otras edificaciones. A pesar de esto, las limitaciones en infraestructura y condiciones de trabajo del laboratorio actual dificulta que pueda ampliar sus servicios a verificación de materiales de fabricación nacional e importados. El objetivo de esta investigación es analizar la factibilidad de establecer un laboratorio que, a partir de la experiencia del LAPCI, pueda certificar los materiales de acuerdo a las normativas vigentes. Para esto se determina la necesidad en equipos, profesionales y suministros y se hace un estimado de costos a partir de la información nacional y la recomendación del LAPCI. Con esto, se realiza un análisis PEST y un análisis de flujo efectivo sin financiamiento que, mediante la Tasa Interna de Retorno y el Valor Actual Neto, permite concluir que el proyecto es rentable y, además, una necesidad vigente a nivel país.

ABSTRACT

The Fire Protection Laboratory (LAPCI) at the University of Costa Rica has allowed research focusing mainly on construction materials, ensuring safety in homes and other buildings. Despite this, the limitations in infrastructure and working conditions of the current laboratory make it difficult to expand its services to the verification of manufacturers and importers. This research aims to analyze the feasibility of establishing a laboratory that, based on the experience of LAPCI, can certify materials following current regulations. The need for equipment, professionals, and supplies is determined, and a cost estimate is made based on national information and the LAPCI recommendation. With this, a PEST analysis and a cash flow analysis without financing are performed, which, through the Internal Rate of Return and the Net Present Value, allow us to conclude that the project is profitable and, in addition, a current need at the country level.

I. INTRODUCCIÓN

El fuego ha sido vital para el desarrollo de la humanidad desde épocas prehistóricas. A pesar de esto, por su capacidad destructiva se ha vuelto necesario una carrera constante por constatar su control. Para el año 2020, se registraron en Costa Rica 918 incendios estructurales, donde la mayoría fueron registrados en dormitorios y cocinas. [1] Se evidencia entonces la necesidad de salvaguardar a la población y sus viviendas de un recurso tan accesible y con tanto poder destructivo.

Es con el motivo de garantizar la seguridad de la población que se ha elaborado normativa que busca retardar y detener la propagación del fuego en construcciones, con el fin de evitar un desastre a grandes escalas. No obstante, es necesario el establecimiento de entes, laboratorios y profesional capacitado para realizar pruebas que garanticen el cumplimiento de la norma. Es en este marco de necesidad nacional que la Universidad de Costa Rica funda la licenciatura de Ingeniería Mecánica con énfasis en Protección Contra Incendios y, junto a este, el Laboratorio de Pruebas Contra Incendios (LAPCI). El quehacer de este laboratorio es el estudio del comportamiento de materiales ante el fuego, lo que permite determinar resistencia al fuego, tiempo de propagación, densidad óptica del humo y puntos de inflamación. [2] Además, permite formar al estudiantado de la licenciatura en estos temas, permitiendo tener profesionales que satisfagan la necesidad de los costarricenses por infraestructura segura. Este es el único laboratorio de este tipo que existe en el país, no obstante, no brinda servicios a nivel comercial.

Surge entonces, tomando en cuenta el personal ya capacitado en protección contra incendios del laboratorio, la idea de transformar el LAPCI en un ente que no solo atienda la necesidad académica y de investigación, sino también la necesidad país para la instalación de sistemas seguros. A pesar de esto, se encuentra rápidamente con obstáculos, ya que este laboratorio está instalado en un pequeño complejo universitario, cuya construcción fue inicialmente pensada para un centro comercial. Esto, junto al gran flujo de estudiantes, profesores y administrativos cerca, limita el ingreso de materiales para hacer pruebas, así como la construcción de hornos de mayor tamaño. Es importante tomar en cuenta que el laboratorio, por la naturaleza de su labor, genera temperaturas altas, gases y exposición a cilindros de gases combustibles, lo que hace difícil e incluso riesgoso una expansión en las actuales condiciones. Se vuelve entonces necesario considerar una reubicación o establecimiento de un laboratorio de servicios de este tipo, ya que contribuirá en el desarrollo nacional al permitir a las empresas cumplir con los requerimientos del Reglamento Nacional de Protección contra Incendios. Por otro lado, contribuirá a la seguridad humana en el país, al asegurar el cumplimiento de la normativa permitiendo que se cuente con materiales probados en laboratorio.

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis de los recursos necesarios para establecer un laboratorio de análisis del comportamiento de materiales expuestos al fuego. Esto a partir de una investigación y análisis de los ensayos y equipos necesarios, así como la rentabilidad financiera del proyecto.

II. METODOLOGÍA

A. Identificación del nicho de mercado

Debido a las capacidades reducidas de un laboratorio en su inicio, se busca cubrir en su capacidad de medición inicial pruebas que beneficien a la mayoría de la población: desde grandes fábricas a pequeñas casas residenciales. Para esto se realiza un análisis de la normativa vigente, donde se incluye el Código de Trabajo, el Reglamento General de los Riesgos del Trabajo, el Reglamento 0163 - Reglamento nacional de protección contra incendios, Ley 8228 - Ley del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, Permisos Municipales y Normativa referente a materiales de construcción, incluido, pero no limitada a: Reglamento Técnico RTCR 491:2017 Materiales de Construcción. Láminas de Fibrocemento y la Norma ISO/IEC 17025 Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. A partir del análisis anterior, se plantea el proyecto para cubrir en primera instancia la necesidad detectada de prueba de llama superficial de láminas de fibrocemento de acuerdo con la reglamentación, siendo este el principal nicho de inversión. Esto debido a que la prueba de láminas de fibrocemento se debe hacer para un lote cada vez que se comercialicen láminas en el país, además de utilizarse en la mayoría de construcciones [3]. De esta manera, se garantiza poder satisfacer una necesidad de la mayoría de la población y con el volumen suficiente para hacer factible el proyecto. Aparte de esto, se decide contar con otros equipos que permitan hacer pruebas adicionales.

B. Estimación de costos.

A partir de lo que indica la prueba de llama superficial de acuerdo ISO 8336:2011[3] y la experiencia de lo que se requiere mínimamente en un laboratorio del fuego, se decide un estimado de los costos de equipo a partir de la información brindada por el LAPCI. Se decide por los siguientes equipos: Horno condicionador de muestras de 75cmx75cmx75cm, Horno mufla pequeño de 25cmx25cmx25cm, Horno grande de 75cmx75cmx75cm, para temperaturas de 1200°C, Propagación de llama horizontal, Propagación llama vertical, IMO Propagación llama lateral y un Microcalorímetro de combustión. Todo lo anterior se estima a un costo \$153 377.

Para la prueba de resistencia al fuego, la cual es la prueba principal del laboratorio, se determinan los costos y ganancias que, de acuerdo a la norma, requeriría una prueba de resistencia al fuego durante una hora. Se toma en cuenta el consumo eléctrico y de combustible necesario con información hasta el año 2023, el pago de 2,5 horas profesionales y 1 hora asistente, así como otros insumos y gastos mostrados en la CUADRO I. Se toma en cuenta el costo estimado de realizar otras pruebas en caso de ser necesario. Una CUADRO de resumen de la inversión inicial se muestra en la CUADRO I.

CUADRO I
RESUMEN DE LOS COSTOS TOTALES PARA LA INVERSIÓN INICIAL

Permisos ambientales		Permisos legales		Inversión Acondicionamiento Infraestructura	
Aspecto	Inversión	Aspecto	Inversión	Aspecto	Inversión
Estudio de impacto ambiental	\$3,000	Inscripción Ministerio de Hacienda	\$1,500	Acondicionamiento Infraestructura	\$20,000
Permiso de funcionamiento hornos	\$3,000	Seguro Comercial	\$1,000	Inversión Equipos Tecnológico	
Trámite Certificado uso de suelo	\$1,000	Permisos Municipales	\$1,000	TOTAL Equipos	\$153,377
Permiso Sanitario Funcionamiento	\$1,000	Registro Caja Costarricense de Seguro Social	\$500	Inversión Promoción	
Inversión para cumplir con Ley 7600	\$7,000	Inscripción Registro de la Propiedad (Sociedad Responsabilidad Limitada)	\$400	Inversión Promoción	\$8,440
Inversión permisos ambientales	\$15,000	Inversión permisos de funcionamiento (legal)	\$4,400	TOTAL INVERSIÓN INICIAL	\$201,218

A partir del estimado de costos, se realiza un cálculo de ingresos para los cinco primeros años, con un aumento anual de 2% en las pruebas. El cálculo de ingresos se muestra en la CUADRO II.

CUADRO II
ESTIMACIÓN DE LOS INGRESOS PARA LOS PRIMEROS 5 AÑOS

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Cantidad de pruebas tipo A	106	140	150	160	160
Cantidad pruebas adicionales	23	40	45	50	55
Costo por prueba tipo A	¢694000	¢707880	¢722038	¢736478	¢751208
Costo por pruebas adicionales	¢1250000	¢1275000	¢1300500	¢1326510	¢1353040
Ingresos por pruebas tipo A	¢73564000	¢99103200	¢108305640	¢117836536	¢120193267
Ingresos por pruebas adicionales	¢28750000	¢51000000	¢58522500	¢66325500	¢74417211
INGRESOS TOTALES (Colones)	¢102314000	¢150103200	¢166828140	¢184162036	¢196610478
INGRESOS TOTALES (Dólares)	\$187732	\$275419	\$306107	\$337912	\$357083

A partir de la información de costos e ingresos, se realiza un análisis cuantitativo y cualitativo de la factibilidad de llevar a cabo el proyecto. Para esto, en resultados se realiza un análisis PEST (Político Económico Social y Tecnológico) para la parte cualitativa y, a partir de un análisis de costos, un cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN) para el resultado cuantitativo de la factibilidad financiera del proyecto.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó el análisis PEST, el cual se muestra en la CUADRO III, para un laboratorio de ensayos de caracterización de materiales expuestos al fuego, para determinar cualitativamente los factores externos que pueden afectar el proyecto. A partir del análisis de la tabla, se concluye que los positivos son lo suficientemente significativos como para determinar que el proyecto no es solo atractivo, sino también una necesidad a nivel país.

CUADRO III
ANÁLISIS PEST REALIZADO A PARTIR DE LAS CONDICIONES DEL ENTORNO

Políticos	Regulaciones gubernamentales y estándares de seguridad relacionados con los materiales expuestos al fuego.(+)	Campañas de información de instituciones sobre la importancia de certificaciones de resistencia al fuego.(+)	Cambios en las políticas fiscales y arancelarias que pueden afectar el costo de los equipos y suministros necesarios para la realización de pruebas y ensayos. (-)
Económicos	Aumento de los proyectos de construcción urbanísticos en el país por la reducción de costos de los fabricantes al no tener que realizar las pruebas fuera del país. (+)	Fluctuaciones en la economía que pueden afectar la inversión en pruebas y ensayos.(-)	Presión en los precios y costos de los servicios debido a la competencia en el mercado. (-)
Sociales	Mayor conciencia de los consumidores en la seguridad y calidad de los materiales utilizados en productos que pueden estar expuestos al fuego.(+)	Reducción del impacto de los incendios al contar con mayor oferta de materiales con certificación de resistencia al fuego. (+)	Cambios en las preferencias de nuevos materiales y necesidades de los clientes que pueden afectar la demanda de pruebas y ensayos. (-)
Tecnológicos	Desarrollo y avances en tecnología de materiales adaptados a la reglamentación nacional, que pueden requerir nuevas pruebas y ensayos para garantizar su seguridad. (+)	Innovaciones en equipos y tecnologías de ensayos que pueden mejorar la eficiencia y precisión de las pruebas, además de certificar materiales que por el momento no se pueden certificar. (+)	Desarrollo de nuevas tecnologías que aumenten los precios de insumos técnicos necesarios para la realización de pruebas. (-)

Para el análisis financiero, se considera toda la información recolectada en este proyecto y se realiza el flujo del proyecto puro, es decir, sin financiamiento externo, a 5 años. Para la tasa de descuento, siendo esta el interés que se espera recibir de retorno por la inversión, se estima a la tasa del sector que es de 9.46%. En el caso del impuesto sobre la renta se utilizó la escala definida por el Ministerio de Hacienda y se hizo el cálculo respectivo para los ingresos del proyecto. Para el capital de trabajo se utilizó el método de periodo de desfase. Tanto el flujo como los resultados se muestran en la CUADRO IV.

CUADRO IV
CÁLCULO DEL FLUJO DE EFECTIVO PARA EL PROYECTO SIN FINANCIAMIENTO

Flujo de Efectivo Proyecto puro						
RUBRO	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$187732	\$275419	\$306107	\$337812	\$357083
(-) Costos fijos operativos		\$18404	\$18772	\$19.147,00	\$19.530,00	\$19321
(-) Costos fijos mantenimiento		\$17364	\$17885	\$17.895,00	\$17.885,00	\$17885
(-) Costos variables		\$1523	\$3196	\$3196	\$3196	\$3196
[=] Utilidad Bruta		\$150441	\$235567	\$265879	\$297302	\$316082
(-) Gastos administrativos		\$87371	\$91740	\$96327	\$101143	\$106201
(-) Gastos por alquiler		\$30000	\$33000	\$36300	\$39930	\$43923
(-) Gastos por permisos anuales		\$3500	\$3500	\$3500	\$3500	\$3500
(-) Gastos de promoción y publicidad		\$12697	\$13078	\$13471	\$13875	\$14291
(-) Gastos no desembolsables (depreciación)		\$16388	\$16388	\$16388	\$16388	\$16388
(-) Gastos por intereses						
[=] Utilidad Antes de Impuestos (UAI)		\$485	\$77861	\$99894	\$122466	\$131780
(-) Impuesto de renta		\$0	\$13193	\$17335	\$21850	\$23713
[=] Utilidad después de Impuestos (UDI)		\$485	\$64667	\$82559	\$100616	\$108068
(-) Gastos no desembolsables (depreciación)		\$16388	\$16388	\$16388	\$16388	\$16388
(-) Incremento en el capital de trabajo	\$15448	\$16380	\$17162	\$17897	\$18888	
(-) Recuperación del capital de trabajo						\$85875
(-) Nueva inversión requerida	\$201218					
(-) Recuperación de la inversión						\$71439
(-) Amortización a la deuda						
[=] Flujo de efectivo nominal	-\$216665	\$493	\$63893	\$80949	\$98115	\$281769
Flujos descontados	\$363160					
VAN (valor actual neto)	\$146495					
TIR (Tasa interna de retorno)	24.79%					

El valor actual neto es de \$146495,20; esta es la ganancia neta a valor presente que genera el proyecto después de cubrir la inversión inicial y rentar lo exigido por la tasa de descuento. Como el VAN es mayor a cero, se concluye que se recupera la inversión inicial, además que, su monto por encima de cero muestra una ganancia importante. El TIR, 24,79%, es la tasa máxima de rendimiento que se puede obtener de este negocio. Está por encima de la tasa de descuento, demostrando

que el proyecto es rentable. El período de recuperación es de 3,73 años, calculado con el flujo de descuentos acumulados. En este tiempo se generan los fondos que igualan al total de la inversión.

CONCLUSIÓN

Se define que el proyecto es rentable con inversión propia, ya que da un VAN positivo y la tasa interna de retorno es mayor a la tasa esperada. Es importante reconocer que ante la apertura del laboratorio se podrían correr distintos riesgos inherentes a la industria o como producto del entorno, por lo que se aconseja mantener las estrategias de mitigación actualizadas, modificándolas de ser necesario en relación con el funcionamiento del laboratorio, así como los aspectos externos. Además, se recomienda prestar especial atención al crecimiento de la competencia en el sector, ya que como parte del estudio se reconoce el interés a nivel país de abrir más laboratorios que ofrezcan estos servicios. Después de realizar el análisis técnico del proyecto, se comprueba que todo aquello que tenga relación con el funcionamiento y operación del proyecto, como lo son las estimaciones de datos, que deben ser lo más cercano a la realidad, permitirá una toma de decisiones favorable en el momento de determinar adecuadamente el tamaño del proyecto, equipos a adquirir, personal operativo y así dimensionar la inversión necesaria.

Finalmente, se concluye que un laboratorio del fuego es una necesidad imperante a nivel país, además de rentable. La Universidad de Costa Rica con el LAPCI ha hecho el papel necesario en materia de investigación y formación en materia de protección contra incendios, no obstante, se insta con este proyecto a las autoridades pertinentes a considerar establecer también un laboratorio con mayor capacidad que permita aumentar la capacidad investigativa y satisfaga la necesidad comercial y constructiva del país. Un laboratorio de este tipo permitiría hacer aportes para proteger la vida humana y, además, fortalecer la economía del país.

REFERENCIAS

- [1] Unidad de Ingeniería de Bomberos, “Reporte de Incendios Investigados del 01 de enero al 31 de diciembre del año 2020,” Bomberos Costa Rica, San José, Costa Rica, 2023. Accesado: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.bomberos.go.cr/inicio/noticias/estadisticas/>
- [2] Sede Interuniversitaria de Alajuela. “Laboratorios SIA UCR.” sia.ucr.ac.cr. Accesado: 27 de febrero del 2025. [En línea]. Disponible: <https://sia.ucr.ac.cr/laboratorios/>
- [3] Láminas planas de fibrocemento - Especificación de Productos y Métodos de Ensayo, ISO 8336, Organización Internacional de Estandarización, Ginebra, mayo de 2009.

Contextualización de la expectativa hacia los graduados de ingeniería mecánica en habilidades de tolerancias y dimensionado geométrico (GD&T)

Contextualizing the demand for GD&T Skills for mechanical engineering graduates

Arnoldo Castro

Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica

Universidad de Costa Rica arnoldo.castrocastro@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Industria, dimensionado geometrico, tolerancias, dibujo, curricular.

Keywords:

Industry, geometric dimensioning, tolerances, drawing, curriculum.

RESUMEN

La Geometría de Dimensionamiento y Tolerancias (GD&T) es un lenguaje simbólico estandarizado crucial en la ingeniería y manufactura moderna. Este lenguaje es esencial para comunicar inequívocamente las especificaciones de diseño y las tolerancias. A pesar de su importancia, existe una brecha persistente en el conocimiento de GD&T entre los recién graduados de ingeniería mecánica con respecto a las expectativas de parte de la industria. Este trabajo expone la necesidad expuesta por la industria y la contextualiza tanto en el marco de la enseñanza académica y en el contexto de la formación de los ingenieros mecánicos a nivel internacional. Se muestra que el dominio del lenguaje de GD&T es una habilidad técnica cuyo desarrollo se adquiere principalmente en la práctica. Se proponen acciones remediales a tomar por parte de la academia para contribuir a cerrar la brecha de habilidades percibida por la industria sin sacrificar la naturaleza integral de la formación universitaria.

I. INTRODUCCIÓN

El dimensionado geométrico y tolerancias (GD&T - Geometric Dimensioning and Tolerancing) es una piedra angular de la ingeniería y la manufactura moderna. El estándar de GD&T provee un lenguaje simbólico preciso para definir y comunicar especificaciones y tolerancias de diseño [1]. Permite que todas las partes involucradas en el ciclo de vida de la manufactura de un producto, desde el diseño final hasta la inspección, tengan acceso a un entendimiento claro y sin ambigüedades de los requerimientos de una parte [2], [3]. Al establecer un método uniforme de interpretar planos de ingeniería, se minimizan las posibilidades de malinterpretar las intenciones de diseño. Con esto, se reducen los errores de manufactura y la necesidad de retrabajos costosos. El uso efectivo de GDT

contribuye a una mejora en la calidad del producto y mayor eficiencia de los procesos de fabricación ya que reduce costos de manufactura e inspección [4], [5].

A pesar de su creciente relevancia en la industria, los programas académicos de formación universitaria no suelen dedicarse al estudio y puesta en práctica de GDT. Esto ha sido manifestado por diversos representantes de la industria en repetidas ocasiones [citar cinde, avionyx, videndum]. Esta brecha en habilidades suele retrasar el proceso de adaptación del recién graduado a la industria y disminuye su habilidad para contribuir de manera efectiva en equipos de diseño y en roles de manufactura. La realimentación recibida por parte de la industria suele enfatizar la debilidad de los estudiantes al aplicar normas de GDT y de estándares en general [6]. Remedialmente, las compañías invierten tiempo y recursos considerables entrenando a su fuerza laboral en estas habilidades [2].

Por estas razones, existe una demanda expresa ante las universidades y en particular, la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, de implementar cambios en los cursos y planes de estudio de bachillerato y licenciatura para formar a los estudiantes en el manejo del lenguaje de GD&T. El llevar a cabo modificaciones curriculares para atender esta necesidad de la industria deben ser llevadas a cabo considerando la naturaleza integral de la formación en ingeniería mecánica a nivel universitario, la cual tiene la misión de formar ingenieros para desempeñarse en una amplia variedad de roles profesionales que involucran tanto la industria, la academia y el ejercicio liberal de la profesión. Cualquier modificación curricular implementada en un plan de estudios universitario debe ir de la mano con un correcto entendimiento de las necesidades de formación que la sociedad requiere de los profesionales y de una adecuada contextualización del problema a resolver.

En la sección III se expone la historia del estándar ASME Y14.5 y el contexto en que se aplica en la actualidad tanto en la academia con la industria. En la sección IV se presentan los esfuerzos realizados por alinear las necesidades de la industria con la actividad académica. Finalmente, en la sección V se establece un plan básico de acción como punto de partida para una reforma curricular integral.

II. ANTECEDENTES

Las bases conceptuales del Dimensionado y Tolerancias Geométricas (GDT) se establecieron durante un período de intensa demanda de manufactura y la necesidad de que las partes producidas fueran altamente intercambiables como lo fue la Segunda Guerra Mundial [7]. Los sistemas de tolerancias tradicionales basados en mediciones coordinadas y tolerancias bilaterales resultan insuficientes cuando se trata de ensambles complejos. Muchas ambigüedades producto de las tolerancias tradicionales se eliminaron al establecer el concepto de posición verdadera en los primeros textos sobre GD&T [7].

Los primeros esfuerzos en estandarizar los principios de GDT nacieron en el contexto militar, con el estándar MIL-STD-8 de 1949, seguido de una revisión en MIL-STD-8A. Posteriormente, este estándar fue reemplazado por el estándar ASME/ANSI Y14.5 en 1973 [7]-[9]. Desde entonces este estándar ha pasado por numerosas revisiones para adaptarse a nuevas tecnologías como el diseño

asistido por computadora o la definición basada en modelos. La última revisión de este estándar fue en 2018 y es el estándar de facto en los Estados Unidos y en buena parte del mundo [9], [10].

Concurrentemente, la ISO ha desarrollado su propio sistema para definir las especificaciones geométricas de partes de ensamble. Este sistema se conoce como ISO GPS (Geometrical Product Specifications) y su versión más reciente es la ISO 1101:2017. El ISO GPS fue desarrollado con base en información de estándares y normas europeas y su objetivo es proveer un sistema de aplicación global. A diferencia de ASME Y14.5, el cual es autocontenido, el sistema ISO GPS comprende más de 150 normas. Entre estas destacan la ISO8015, la cual establece las reglas fundamentales del sistema de especificación geométrica, la ISO1101 que define la simbología GPS y su uso, y la ISO2768 que establece estándares para dimensiones y características sin tolerancias [10], [11].

La adopción de un estándar o de otro varía según la región de influencia en que se ubica la industria específica y sus lazos dentro de la cadena de suministro. En Estados Unidos, el estándar ASME Y14.5 domina la práctica en la industria. Algunos sondeos estiman que este estándar domina la manufactura en hasta un 90% de la industria estadounidense [10]-[12]. Esta arraigada adopción hace que la competencia en ASME Y14.5 sea una expectativa común para los ingenieros que trabajan en industrias estadounidenses o que les suministran productos y servicios, como es el caso de la mayoría de la industria de zona franca en Costa Rica.

Historia del estándar ASME Y14.5



Fig. 1. Historia del estándar ASME Y14.5.

Debido a la alta penetración de la industria estadounidense en los mercados mundiales, el estándar ASME Y14.5 tiende a predominar por sobre el sistema ISO-GPS a nivel global [10], [11]. Si bien, su penetración no es absoluta en algunas regiones como en Europa donde el sistema ISO GPS domina en algunos países [13]. Sin embargo, la inversión de la industria estadounidense en países emergentes hacen que el estándar ASME Y14.5 sea más común fuera de los mercados europeos por sobre el sistema ISO, tal y como sucede en Costa Rica. La existencia de ambos sistemas también ha puesto en la posición a la industria de encontrar maneras de trabajar con ambos [10], [14]. Esto sugiere un entorno cada vez más complejo para ingenieros y organizaciones donde la

demanda de habilidades en ambos sistemas va en aumento. Este panorama sugiere que si bien las habilidades en GDT se encuentran en demanda en el mercado laboral, no son una habilidad fundamental requerida en la fuerza laboral. La habilidad fundamental es la interpretación y puesta en práctica de estándares en general, y más específicamente, de ser capaces de comprender sistemas de dimensionamiento y tolerancias para la manufactura avanzada de ensambles mecánicos.

A. Enseñanza de ASME Y14.5 en la educación técnica y universitaria

Si bien el estandar ASME es de origen estadounidense, su enseñanza en la educación superior de ese país es limitada o superficial. De los programas de ingeniería acreditados por ABET apenas un 17% reportan incluir GDT en sus planes de estudio [15]. En contraste, mas del 90% de las escuelas técnicas que ofrecen formación en mecánica de precisión lo enseñan a sus estudiantes. Esta disparidad refleja que las habilidad de manejar el lenguaje de GDT es primordial en el entorno de manufactura mas no necesariamente en el ejercicio de la ingeniería mecánica en un sentido más amplio. Debido a esto, la fracción de graduados de ingeniería mecánica que si requieren de capacidades de GDT para en sus trabajos se ven en la necesidad de matricular cursos de formacion suplementaria [2]. Mientras los planes de estudio de ingeniería mecánica se limitan a enseñar una introducción teórica al tema, numerosos programas de formacion profesional de educación continua, tanto adentro como fuera de las universidades, se dedican a satisfacer la demanda de desarrollo de estas capacidades de forma complementaria.

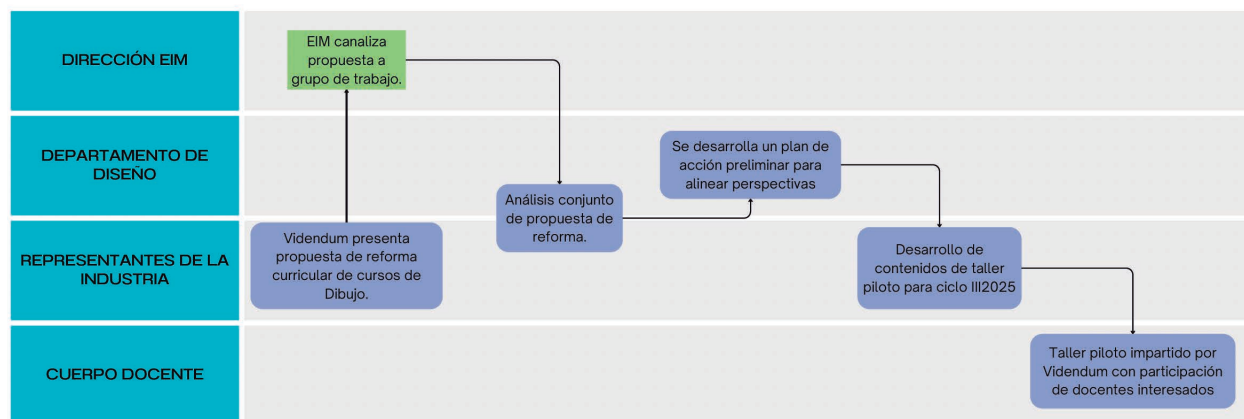


Fig. 2. Proceso de atención de propuesta de reforma presentada por la industria.

El hecho de que la enseñanza del estándar ASME Y14.5 no sea generalizada en los programas de Ingeniería Mecánica en Estados Unidos sugiere que integrarla al plan de estudios de formación universitaria es una tarea compleja. Además, existe una desconexión entre la importancia de que esta habilidad para el sector industrial con respecto a la que se percibe en círculos académicos. Además, es muy probable que exista una limitación de recursos tanto materiales como humanos para integrar de manera satisfactoria la formación en GDT en las actividades académicas.

III. ALINEAMIENTO DE LA INDUSTRIA Y EL CONTEXTO ACADÉMICO

El punto de partida de esta iniciativa surgió de una serie de reuniones colaborativas con representantes del sector industrial, quienes plantearon la necesidad de revisar y adecuar ciertos aspectos de la formación actual de los futuros ingenieros. Ante este planteamiento, la institución académica convocó a un grupo de docentes del departamento pertinente para analizar en profundidad las observaciones y propuestas recibidas, buscando comprender las brechas existentes entre el currículo universitario y las demandas prácticas del entorno profesional.

La Dirección del Departamento asumió la coordinación de este estudio preliminar, que incluyó la identificación de esfuerzos similares y buenas prácticas implementadas en otras instituciones y latitudes en cuanto a la vinculación industria-academia y la actualización curricular. Como resultado de esta fase inicial de análisis y diagnóstico, se elaboró un borrador de propuesta de reforma formativa, identificando particularmente áreas donde la exposición de los estudiantes a la realidad y el "lenguaje" de la industria era limitada o inexistente. Se constató que ciertos conceptos y procesos, si bien abordados teóricamente, nunca habían sido presentados a los estudiantes desde una perspectiva tangible y aplicada, lo que dificultaba su comprensión del alcance y la complejidad real.

Para validar y refinar esta propuesta antes de una posible implementación a mayor escala, se diseñó la realización de un taller piloto intensivo, programado para el verano de 2025. Este taller contó con la participación voluntaria de profesionales provenientes de la industria, así como de académicos interesados del departamento. La empresa Videndum ofreció su valiosa colaboración, facilitando un espacio y recursos para la ejecución práctica del taller. El temario se planteó de forma conjunta, buscando abordar aquellos aspectos identificados como críticos por la industria.

El taller piloto tuvo múltiples objetivos:

- Para la industria: Exponer a los profesionales a la dinámica universitaria actual, permitiéndoles conocer la realidad de la institución y sus estudiantes, contrastándola posiblemente con percepciones basadas en su contacto como estudiantes décadas atrás.
- Para los estudiantes (implícito en el diseño): Ofrecerles una experiencia práctica y significativa que diera sentido tangible a temas que, sin experiencia en la industria, resultan abstractos.
- Para los profesores: Permitirles observar de primera mano la complejidad de la aplicación real de los conceptos teóricos, comprendiendo que la práctica va mucho más allá de la mera comprensión de simbología o principios básicos. También, identificar la necesidad de apoyo externo especializado para el aprovechamiento de herramientas específicas ya existentes en la universidad, como la Máquina de Medición por Coordenadas (CMM, por sus siglas en inglés).

La dinámica del taller incluyó sesiones teóricas-prácticas en las instalaciones de la escuela y una visita in-situ a la empresa. La visita a la empresa permitió a los académicos y estudiantes observar de primera mano la complejidad de los ensambles que se trabajan en la industria y el trabajo involucrado en su diseño y control de calidad.

Este ejercicio piloto validó la necesidad de incorporar activamente el lenguaje en la formación del ingeniero mecánico. A la vez, visibilizó que esta incorporación debe ser un proceso transversal a lo largo de todo el plan de estudios debido a que GDT no se aplica solamente a la hora de dibujar el plano de una pieza, sino también durante su manufactura e inspección. Es decir, el estudiante de ingeniería mecánica requiere de emplear el lenguaje de GDT a la hora de diseñar, fabricar y validar. Asimismo, evidenció la importancia de la colaboración directa con la industria para enriquecer la perspectiva docente sobre la aplicación real de los conocimientos.

Los contenidos cubiertos en este taller se enfocaron en las bases del lenguaje y en la implementación de este en un proyecto de diseño básico. En la última sesión, los estudiantes expusieron sus proyectos para recibir retroalimentación de los profesionales de la industria. Las actividades realizadas se muestran en el CUADRO I.

CUADRO I
CONTENIDOS DEL TALLER PILOTO

Clase	Temas
Clase 1	Generalidades de Planos Mecánicos
Clase 2	Generalidades del Lenguaje de Dimensionamiento y Tolerancias Geométricas
Clase 3	Controles de Forma (modo de especificación, métodos de medición)
Clase 4	Controles de Orientación/Runout/Concentricidad y Simetría (modo de especificación, métodos de medición)
Clase 5	Controles de Posición y Perfil de línea/superficie (modo de especificación, métodos de medición)
Clase 6	Visita a Videndum
Clase 7	Mini proyecto

IV. PLAN DE ACCIÓN CURRICULAR

Si bien existe una demanda en un segmento del mercado laboral por graduados de ingeniería mecánica con conocimiento funcional en el lenguaje del estándar ASME Y14.5, el amplio y diverso papel que ejercen los ingenieros mecánicos en diversos sectores industriales exige que cualquier reforma curricular conserve el objetivo de formar integralmente a los profesionales de este campo del conocimiento. Por lo tanto, el graduado de ingeniería mecánica debe ser suficientemente versátil para poder adaptarse a cualquier industria, aún aquellas donde el estándar ASME Y14.5 no lo es de uso cotidiano. Por lo tanto, la enseñanza del lenguaje de GD&T no puede darse en detrimento de la formación en otros ámbitos. El diseño de ensambles mecánicos, el estudio de los procesos de manufactura de precisión y la metrología ya es parte del plan de estudios de Ingeniería Mecánica. Sin embargo, estas tres áreas del conocimiento trascienden actividades relacionadas al diseño de ensambles mecánicos. Por lo tanto, sería perjudicial reorientar alguna área del plan de estudio hacia la aplicación de diseño de ensambles mecánicos. Aunque se suele percibir el tema de GD&T como

el estudio de un lenguaje simbólico que puede ser cubierto en un curso de dibujo, el curso de dibujo sirve otros fines adicionales a estos. Aún más, el estudio de GD&T no puede darse en aislamiento de otras normas como la ASME Y14.43, la cual establece lineamientos para el diseño y construcción de patrones funcionales [16].

Por lo tanto, considerando la complejidad del tema a atender, así como las necesidades diversas de formación que requiere el ingeniero mecánico, se proponen dos acciones para atender demanda de habilidades en GD&T:

1. Establecer oportunidades de formación complementaria basada en cursos de educación continua para ingenieros que se desempeñan en la industria.
2. Reforma curricular integral para incorporar el estandar ASME Y14.5 en todas aquellas actividades relacionadas al diseño, fabricación y calidad de ensambles mecánicos.

A. Cursos de formación complementaria

Debido a que una reforma integral al plan de estudios toma un tiempo considerable desarrollar e implementar, es recomendable poner en marcha acciones remediales que brinden oportunidad a los profesionales que ya ejercen así como estudiantes activos de aprender sobre GD&T. Una forma practica de hacerlo es mediante la apertura de cursos de educación continua en donde en unas cuantas horas se puede instruir sobre las bases del estándar ASME Y14.5 e implementar un pequeño proyecto práctico. Estos cursos pueden ser impartidos por profesionales que se desempeñan actualmente en la industria y que poseen experiencia en el tema.

B. Incorporación integral del estándar ASME Y14.5 en el plan de estudios

Una reforma curricular efectiva para la enseñanza de Dimensionamiento y Tolerancias Geométricas (GD&T) debe considerar el plan de estudios en su totalidad en lugar de enfocarse en la instrucción basada en la simbología [17].

En cuanto al diseno de los contenidos y las actividades curriculares, se debe priorizar un enfoque aplicado. Se recomienda enfáticamente incorporar actividades hands-on que incluyan la interpretación de planos con GD&T, la medición y verificación de tolerancias en piezas reales y el uso de modelos físicos. Las simulaciones asistidas por computadora (CAD) son herramientas indispensables para visualizar zonas de tolerancia, analizar apilamientos (stack-ups) y entender el impacto funcional de las especificaciones geométricas. Asimismo, la integración de simulaciones de procesos de manufactura, apoyadas en técnicas de prototipado rápido, puede ofrecer a los estudiantes una comprensión más profunda de cómo las especificaciones de GD&T afectan la fabricabilidad y el costo. Es importante también delimitar claramente el alcance de los contenidos en cada nivel del programa, comenzando por los conceptos fundamentales y avanzando progresivamente hacia aplicaciones más complejas, considerando sí se enfoca en el estandar ASME Y14.5, ISO GPS, o ambos, según la pertinencia regional e industrial.

La implementación de esta reforma curricular debería ser progresiva, iniciando desde los cursos más básicos del plan de estudios. Introducir los principios fundamentales de GD&T en las primeras asignaturas de dibujo técnico o diseño puede facilitar una comprensión más intuitiva y acumulativa. A medida que los estudiantes avanzan, los conceptos de GD&T se pueden profundizar y aplicar en contextos más complejos, como el diseño de ensambles, el análisis de tolerancias y la selección de procesos de manufactura y control. Este enfoque ayuda a construir una base sólida y a integrar GD&T como un lenguaje natural en la ingeniería.

Es imprescindible establecer un mecanismo de revisión periódica de la pertinencia de los contenidos y su ajuste continuo. El campo de GD&T evoluciona, con actualizaciones en los estándares (como ASME Y14.5 e ISO GPS) y cambios en las prácticas de la industria. Por ello, el currículo debe ser dinámico, adaptándose a las observaciones del comportamiento del mercado y las necesidades de los empleadores. Esto incluye monitorear si hay un cambio en el estándar dominante a nivel regional o global, o si emergen nuevas herramientas y metodologías en la aplicación industrial de GD&T, asegurando así que los egresados posean las competencias más actuales y demandadas.

CONCLUSIONES

Existe una urgente necesidad de cerrar la brecha entre la formación académica y las exigencias reales de la industria en el manejo del GD&T. Para ello, la enseñanza debe adoptar un enfoque práctico e integrado que permita a los estudiantes construir el conocimiento progresivamente y en todas las fases del manejo del lenguaje. Se proponen la implementación de cursos de formación continua, y una reforma curricular integral que incorpore el estándar ASME Y14.5 de manera transversal en el plan de estudios. Es indispensable que este proceso se realice mediante estrecha colaboración entre la academia y la industria.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer la colaboración del Ing. Danny Fonseca y el Ing. Alejandro Jirón de Videndum por valiosa su colaboración.

REFERENCIAS

- [1] D. Watts, ((The “gd&t knowledge gap” in industry,)) en *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 48051, 2007, págs. 597-604.
- [2] M. Paige, A. Schauer, Z. Klesmith, A. Davis y K. Fu, ((The Impact of Hands-On Geometric Dimensioning and Tolerancing Intervention Activities on Students in Engineering Design.,)) *Advances in Engineering Education*, vol. 11, n.º 2, págs. 66-101, 2023.
- [3] S. G. Acharya, ((Design for productivity using GD&T,)) 1992.
- [4] E. Husted, ((GD&T, MANUFACTURING IMPERATIVE,)) *Quality*, vol. 58, n.º 3, págs. 24-25, 2019.
- [5] THORS Staff Writer, *5 GD&T Benefits Over Traditional Measurements*, <https://thors.com/5-gdt-benefitsover-traditional-measurements/>, Accessed: May 16, 2025, 2025.

- [6] R. L. Mott, R. J. Bennett, M. J. Stratton y S. Danielson, ((Integration of Manufacturing into Mechanical Engineering Education Curricula,)) en *2014 ASEE Annual Conference & Exposition*, 2014, págs. 24-788.
- [7] K. Rennels, ((Current methodologies for geometric dimensioning and tolerancing,)) en *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No. 03CH37480)*, IEEE, 2003, págs. 565-569.
- [8] T. Wilhite, *An Introduction to Military Standards*, Accessed: May 16, 2025, jul. de 2020. dirección: <https://discover.hubpages.com/technology/Commonly-Used-Military-Standards>.
- [9] *ASME Y14.5-2018: Dimensioning and Tolerancing*, Reaffirmed in 2024. ISBN: 9780791872192, 2018. dirección: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/y14-5-dimensioning-tolerancing>.
- [10] Z. Humienny, ((Can ISO GPS and ASME tolerancing systems define the same functional requirements?)) *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 17, pág. 8269, 2021.
- [11] C. Bemis, *A Comparison of GD&T Standards: ISO GPS vs. ASME Y14.5*, Accessed: May 16, 2025, jul. de 2021. dirección: <https://www.gdandtbasics.com/iso-vs-asme-standards/>.
- [12] A. Krulikowski y S. DeRaad, ((Differences Between US Standards and Other Standards,)) *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, pág. 167, 1999.
- [13] M. Maltauro, R. Meneghello y G. Concheri, ((Comparative Analysis of ISO GPS Knowledge and Usage in the Italian Market,)) *Procedia CIRP*, vol. 129, págs. 211-215, 2024.
- [14] A. GDT, ((ISO GPS and ASME GDT standards—differences and similarities in definitions of measurands, Humienny Zbigniew, Zdrojewski Paweł DOI wersji wydawcy/Published version DOI <http://dx.doi.org/10.24425/mms.2023.147954> Adres publikacji w Repozytorium URL,)) 2023. <https://www.youtube.com/watch?v=poC4xVWdrA&t=1137s>, YouTube video, accessed May 16, 2025.
- [15] S. Rizzuti y L. De Napoli, ((The ASME Y14.43 Standard and Its Root in the American Pragmatism,)) en *International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*, Springer, 2021, págs. 259-268.
- [16] D. J. Waldorf y T. M. Georgeou, ((Geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) integration throughout a manufacturing engineering curriculum,)) en *2016 ASEE Annual Conference & Exposition*, 2016.

Ingeniería aplicada en tecnologías de salud

Desarrollo de un Sensor de Temperatura con Redes en Fibra Óptica para Aplicaciones Biomédicas

Development of a Fiber Optic Grating Temperature Sensor for Biomedical Applications

Luis Poveda-Wong

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

e-mail: luis.povedawong@ucr.ac.cr

Código Orcid: 0009-0001-4420-63561

Jaime Cascante-Vindas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

e-mail: jaime.cascante@ucr.ac.cr

Código Orcid: 0000-0002-8023-475X

Luis Diego Marín-Naranjo

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica

e-mail: luis.marin@ucr.ac.cr

Código Orcid: N/A

Palabras clave:

Biomédico, fibra óptica, redes de difracción, sensores, temperatura.

Keywords:

Biomedics, diffraction gratings, fiber optics, sensors, temperature.

RESUMEN

El siguiente trabajo resume los resultados experimentales de un sensor que utiliza una red de período largo en fibra óptica para medir cambios en la temperatura ambiente. Dicho montaje se encuentra en el Laboratorio de Fotónica y Tecnología Láser (LAFTLA) de la Universidad de Costa Rica. Este dispositivo formará parte de un sistema de sensores para aplicaciones biomédicas varias.

ABSTRACT

The following work summarizes the experimental results of a long-period fiber grating setup to measure changes in ambient temperature. The setup is currently functional at the Laboratory of Photonics and Applied Laser Technology (LAFTLA) of the University of Costa Rica. This device will be part of a sensor system for various biomedical applications.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes de difracción en fibra óptica son dispositivos fotónicos que han tenido un altísimo impacto tecnológico desde su descubrimiento [1]. Consisten en una modificación periódica y controlada del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, la cual permite el trasvase de energía entre los distintos modos guiados de la fibra (Fig. 1).

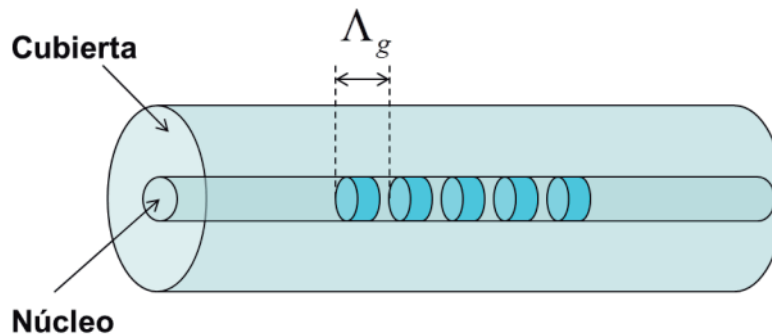


Fig. 1. Red de difracción en fibra óptica. La modificación del índice del núcleo es de periodicidad Λ_g .

Uno de los nichos comercialmente más llamativos en los que las redes de difracción han encontrado aplicaciones es el sensado de magnitudes físicas. Debido a que el acople entre modos es altamente sensible a las condiciones ambientales de la fibra, una red de difracción puede ser usada para monitorizar cambios de temperatura, tensión mecánica, índice de refracción, e inclusive presencia de cadenas muy específicas de ácido desoxirribonucleico (ADN) en disoluciones [2].

Este montaje será utilizado para medir la temperatura de referencia en un sistema más complejo de sensores de fibra óptica, el cual será utilizado para medir variables de índole biomédico. Por ejemplo: biosensores ópticos label-free para la detección de hemoglobina humana [3] y contenido biológico en nanoesferas de sílice mesoporosa del tipo MCM-41 vacías o infiltradas con diferentes colorantes (Eosina Y, Rodamina B. etc) [4].

II. MARCO TEÓRICO Y METODOLOGÍA

Las redes de difracción se pueden clasificar en dos grandes grupos: las redes de período corto o de Bragg (Fiber Bragg Gratings o FBGs) y las de período largo (Long Period Gratings o LPGs). En el caso de las FBGs, la periodicidad del cambio de índice Λ_g es del orden de los nanómetros, mientras que en las LPGs, su periodicidad Λ_g es del orden de los micrómetros.

Para poner a prueba la sensibilidad de una red de período largo ante la temperatura, se utilizó una LPG que se grabó en la Universitat de València (España) durante la estancia de posgrado de L. Poveda-Wong. La red se grabó en una fibra monomodo Fibercore SM980 que previamente había sido sometida a una atmósfera de hidrógeno a presión para aumentar su fotosensibilidad. Posteriormente para su grabación, fue irradiada con un haz láser de 244 nm para producir el

cambio de índice en el núcleo, con una periodicidad de $\Lambda_g = 195,5 \mu\text{m}$ y una longitud total de 7,4 mm.

En el momento de su grabación, con ayuda de una fuente de amplio ancho de banda y un Analizador de Espectros Ópticos (OSA) AQ6375 de marca Yokogawa, se logró determinar su espectro de transmisión, mostrado en la Fig. 2.

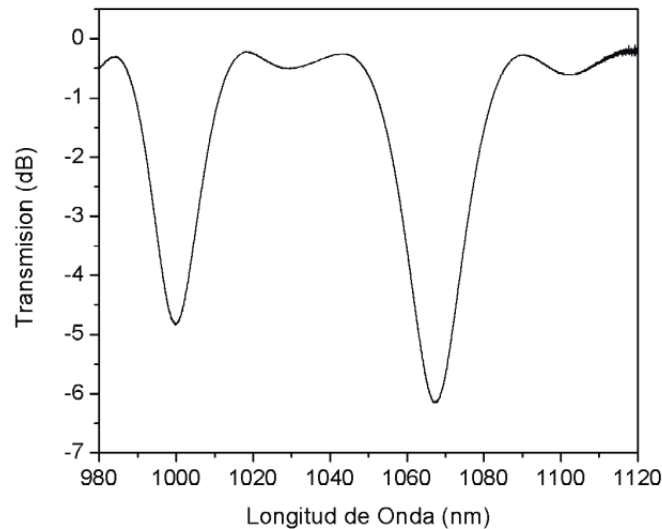


Fig. 2. Espectro de transmisión de la LPG utilizada en el experimento de sensibilidad a temperatura.

Ahora, el montaje del sensor que utilizaremos consiste en una fuente de amplio ancho de banda conectado a la LPG y un OSA. Para variar la temperatura alrededor de la red, se utilizó un enfriador termoeléctrico (TEC). El esquema del montaje se muestra en la Fig. 3.

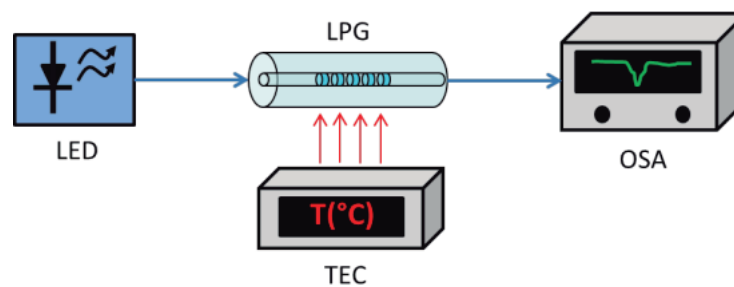


Fig. 3. Esquema del montaje experimental con LPG.

La fuente de radiación óptica es un LED QPhotonics QSDM-1050-2 centrado a 1050 nm para cubrir la segunda resonancia de la red, y que fue estabilizado en corriente y temperatura para el experimento. Se utiliza una corriente de 133 mA, la cual es menor al máximo de 150 mA especificado por el fabricante, a una temperatura de unión de 25 °C.

III. RESULTADOS

Se hicieron mediciones del espectro de transmisión de la red de período largo para temperaturas entre los 20 °C y 80 °C, con pasos de 10 °C y un período de estabilización de la temperatura de 3 minutos. En la Fig. 4 se dibujan cuatro de estos espectros, mostrando cómo en la red efectivamente varía la posición de la resonancia según el valor de la temperatura. Se observa un acoplo de aproximadamente 1 dB menor al del espectro cuando se grabó la red (Fig. 2), además de un desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura.

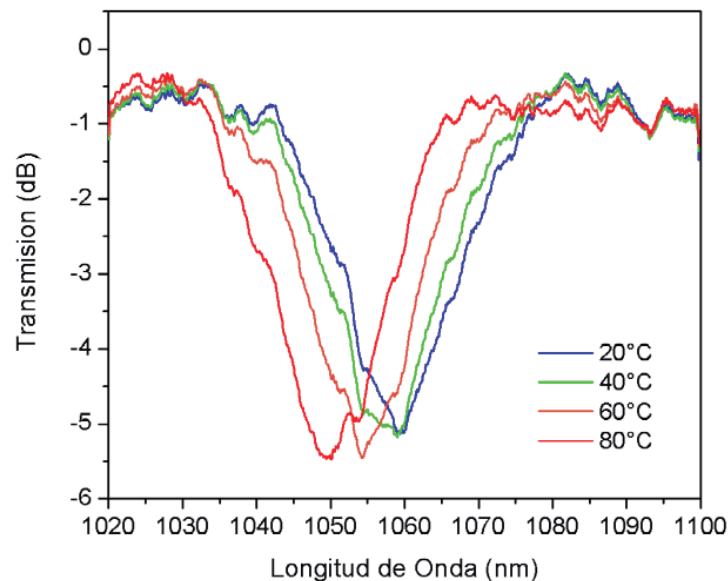


Fig. 4. Detalle del desplazamiento de la resonancia de la LPG debido a la temperatura.

IV. DISCUSIÓN

A partir del experimento se observa claramente que la temperatura en los alrededores de la red de período largo afecta la longitud de onda de acople. Para la red y el modo de la cubierta utilizado, la longitud de onda de acople disminuye al aumentar la temperatura.

En la Fig. 5 se muestra un ajuste lineal al cambio de la longitud de onda de acople con la temperatura. El ajuste indica una sensibilidad de $-0,19 \text{ nm/}^{\circ}\text{C}$, lo cual está en concordancia con resultados obtenidos en otros estudios.

El comportamiento obtenido experimentalmente contrasta con lo que se esperarí considero la expansión térmica de la sílice, y con ella, el incremento de la periodicidad de la red. Sin embargo, el cambio de longitud de onda no depende exclusivamente de la expansión térmica. Para esta configuración particular, el cambio por efecto termo-óptico es negativo, y más significativo que el producido por la expansión térmica, por lo que el cambio de la longitud de onda de acople respecto a la temperatura es negativo.

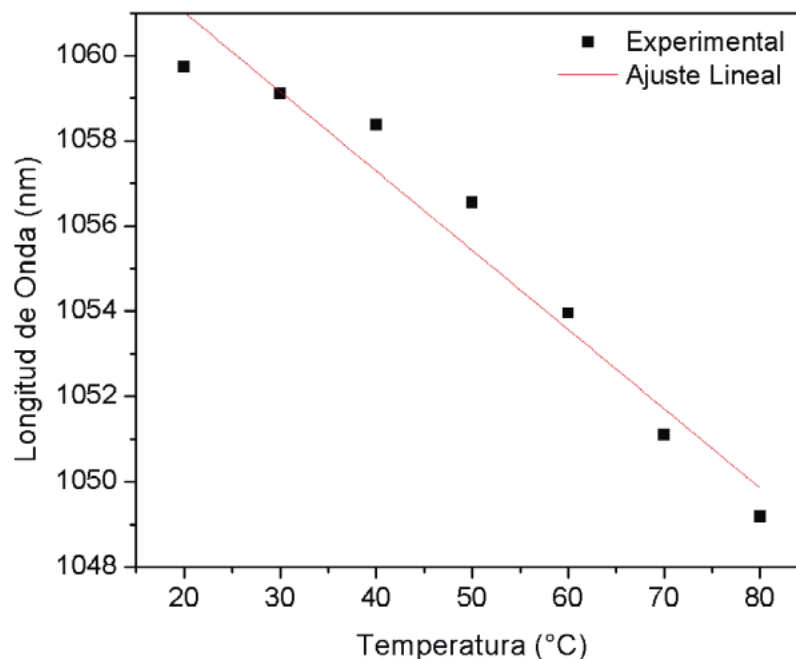


Fig. 5. Ajuste lineal de la variación de la longitud de onda de acople.

CONCLUSIONES

La longitud de onda de acople de una LPG varía con la temperatura según la Fig. 5, de esta manera queda demostrada la posibilidad de utilizar una red de período largo como un sensor de temperatura de forma experimental.

De acuerdo con los resultados obtenidos, este sensor se podría utilizar como sensor de referencia para medir la temperatura en un sistema más complejo de sensores biomédicos de fibra óptica, en el que la temperatura ambiente que rodea las muestras es un factor importante a tomar en cuenta en la medición de otras variables de interés.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a José Luis Cruz Muñoz y Miguel V. Andrés Bou del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia (España) por su ayuda con la confección de la LPG utilizada en este montaje.

REFERENCIAS

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson y B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication", *Applied Physics Letters*, vol. 32, n° 10, pp. 647-649, 1978.
- [2] Jiaying Sun, Luis Poveda-Wong, Hanlin Jiang, Jaime Cascante-Vindas, José L. Cruz, Miguel V. Andrés, Xianfeng Chen, "Hybrid optical fibre grating for label-free biodetection," *Proc. SPIE 13001, Specialty Optical Fibres VIII*, 130010B (20 June 2024); <https://doi.org/10.1117/12.3016659>.

- [3] J. P. Marrou, J. Cascante-Vindas, P. Rodrigo-Martínez, M. Delgado-Pinar, A. Díez, S. Gil, M. V. Andrés, “Multiplexed, space distributed chemo/biosensors by means of time resolved, in-fiber acousto-optic interaction,” Proc. SPIE 13380, Optical Sensing and Precision Metrology, 133800S (19 March 2025); <https://doi.org/10.1117/12.3041831>
- [4] X. Chen, C. Liu, M. D. Hughes, D. A. Nagel, A. V. Hine y L. Zhang, “EDC-mediated oligonucleotide immobilization on a long period grating optical biosensor”, Biosensors and Bioelectronics, vol. 6, n° 2, pp. 1-6, 2015.

Calidad de servicio de la cobertura celular en centros hospitalarios de Costa Rica

Quality of Service of Cellular Coverage in Healthcare Centers in Costa Rica

Áxel Gabriel Hernández Masís
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Costa Rica
e-mail: axel.hernandezmasis@ucr.ac.cr

Gustavo Núñez Segura
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Costa Rica
e-mail: gustavoalonso.nunez@ucr.ac.cr
0000-0002-7124-2125

Palabras clave:

Calidad de servicio, servicio móvil, hospitales.

Keywords:

Service quality, mobile services, hospitals.

RESUMEN

Durante la pandemia de COVID-19 se restringieron las visitas hospitalarias y como alternativa aumentó el uso de herramientas de comunicación a distancia. Aunque estas restricciones ya no existen con la misma rigurosidad, la comunicación remota sigue siendo relevante. Sin embargo, su efectividad depende de la cobertura celular dentro de los hospitales, la cual puede verse limitada por su infraestructura. Este estudio evalúa la calidad del servicio celular en los hospitales México y San Vicente de Paúl. Los resultados muestran deficiencias importantes en la cobertura interior, especialmente en 4G (RSRP), donde algunas zonas registraron niveles de cobertura aceptables en menos del 20 % de las mediciones. En contraste, el servicio 3G (RSCP) mostró mejor desempeño. Estos resultados muestran que la infraestructura actual no garantiza conectividad continua en interiores hospitalarios, afectando la comunicación de pacientes con sus seres queridos.

I. INTRODUCCIÓN

Durante la pandemia del COVID-19 se realizaron cambios drásticos en las políticas de visitas a pacientes en hospitales en todo el mundo con el fin de reducir el contagio de esta enfermedad [1] [2]. No obstante, existe evidencia de que estas restricciones también tuvieron un impacto negativo

en la salud de los pacientes. Por ejemplo, la limitación de visitas podía aumentar el delirio y la necesidad de sedación [3].

Por las características de contagio del virus del COVID-19, el uso de herramientas que permitieran la comunicación a distancia tuvo un incremento con relación a la época previa a la pandemia. En muchos casos, el uso de estas herramientas se mantuvo aún cuando el efecto del virus se reducía [4]. Un caso específico fue el de los pacientes de COVID-19. Para estas personas, la comunicación con sus familiares dependía del acceso tanto del propio hospital a estos dispositivos y tecnología, como de las personas con las cuales querían comunicarse [5]. A pesar de que el uso de dispositivos de este tipo en los hospitales ha estado restringido por su relación con la propagación de patógenos y distracción del personal de salud, su uso durante la pandemia para el caso de pacientes críticos dio resultados positivos [6].

Aunque la pandemia del COVID-19 ya acabó y actualmente no existen las restricciones de visitas que existían en su momento, hay evidencia de que la comunicación de pacientes internados en hospitales con sus seres queridos puede traer beneficios al paciente. En muchos casos, este tipo de comunicación es la única posible, ya sea por las largas distancias, factores económicos o, inclusive, restricciones por la propia condición del paciente.

Ante esta situación, surge la pregunta con relación a la capacidad que tienen los pacientes de comunicarse a distancia por sus propios medios mientras se encuentran internados. A partir de esta pregunta, identificamos algunas limitaciones: i) el acceso a WiFi para los pacientes en los hospitales puede ser limitado y, ii) los hospitales están contruidos con materiales que pueden dificultar la propagación de señales electromagnéticas en las frecuencias utilizadas para estas tecnologías. Esto quiere decir que la comunicación de los pacientes, o incluso personas que acompañan o simplemente están dentro de los hospitales, depende del servicio celular que tengan disponible.

El problema de cobertura celular en edificios grandes no es nuevo y tiene solución técnica. Una forma de hacerlo es por medio de sistemas de antenas distribuidas o la instalación de microceldas. La instalación de estos sistemas depende de la posibilidad de inversión que puede ser por interés de la empresa o institución dueña del inmueble, o del operador que presta el servicio celular. A pesar de la existencia de distintas soluciones, en el escenario hospitalario a nivel latinoamericano, en el 2021, sólo un 5 % de los hospitales poseían sistemas de antenas distribuidas para brindar cobertura celular [7]. A nivel nacional no existe mucha información acerca de este tema en concreto. En el 2015 el ICE indicó que iban a realizar la implementación de sistemas interiores en distintos centros de salud. La instalación debió ser finalizada a finales de 2016, sin embargo, no hay más información acerca de estas implementaciones. Entidades como la Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL) realiza mediciones de cobertura y capacidad de red celular. Sin embargo, estas mediciones se limitan a exteriores.

A partir de estos antecedentes, este trabajo tiene como objetivo evaluar la calidad de servicio de la cobertura celular en centros hospitalarios en Costa Rica, de forma que sea posible determinar la capacidad que tienen pacientes o visitantes de los centros hospitalarios de comunicarse al encontrarse dentro de estos edificios. El alcance de este trabajo incluye dos hospitales: el Hospital

México y el Hospital San Vicente de Paul. Los resultados muestran porcentajes de cobertura para los tres operadores que brindan este servicio en el país.

II. METODOLOGÍA

El concepto de calidad de servicio de cobertura celular es amplio, de forma que fue necesario delimitar el alcance. Primero, se incluyeron dentro del análisis el servicio celular de tercera generación (3G) y cuarta generación (4G). Los servicios de segunda generación no se consideraron porque están en proceso de desconexión por los operadores en el país. La quinta generación tampoco se consideró porque al momento de realizar la investigación no se encontraba activa en el país. Segundo, para la medición de cobertura de la tercera y cuarta generación, consideramos la métrica RSCP, para 3G, y RSRP para 4G.

El proceso se dividió en tres etapas: i) planificación y reconocimiento, ii) mediciones, y iii) análisis de resultados. Durante la etapa de planificación y reconocimiento se visitaron los dos hospitales indicadores previamente. La visita se utilizó para determinar las zonas en las cuales era posible realizar mediciones y en cuales no era posible por razones propiamente del funcionamiento del hospital, tales como quirófanos, cuartos de acceso restringido entre otros. Además, la visita se utilizó para verificar la existencia o no de sistemas de cobertura celular internos.

Para la etapa de mediciones, se emplearon tres terminales móviles, cada uno configurado para operar con un operador específico (Liberty, Claro e ICE), junto con la aplicación G-NetTrack Lite, que se utiliza para monitorear diversos parámetros de la red inalámbrica, incluidos RSCP y RSRP.

Para el análisis de resultados se utilizó una clasificación por niveles de calidad: Los valores se agruparon en categorías como *Excelente*, *Buena*, *Justa*, *Mala* y *Muerta*. Esta clasificación permitió identificar las áreas con mayor probabilidad de poseer problemas de cobertura. En el caso de RSCP, los valores iguales o mayores a -85 dBm se consideraron aceptables, mientras que para RSRP este límite fue de -100 dBm. Para definir estos umbrales se utilizaron las recomendaciones internacionales [8] (RSCP) y [9] (RSRP). También se tomó en cuenta los estándares de la SUTEL, que establecen umbrales de -85 dBm para RSCP y -95 dBm para RSRP. Los valores por debajo de estos límites se consideraron con la probabilidad de presentar problemas de cobertura celular, mientras que los superiores indicaron que la cobertura era adecuada para realizar actividades como llamadas, mensajes y uso de aplicaciones móviles. Estos valores umbral se encuentra en la resolución RCS-152-2017 [10].

III. RESULTADOS

En esta sección se muestran y se discuten los resultados de las mediciones realizadas en ambos hospitales. Los resultados se muestran en cuatro tablas, dos para cada hospital, y se parados según la métrica (RSCP o RSRP). Para este análisis, la resolución de los resultados se muestra a nivel de datos agregados por operador para cada piso por cada uno de los edificios de cada hospital. Con

relación al Hospital México, no hay resultados del piso 2 de los edificios A y B, ya que son las salas de operaciones y está prohibido el paso.

Los resultados obtenidos para el caso del Hospital México se muestran en el Cuadro 1, para RSCP, y Cuadro 2 para RSRP. Para el caso de RSCP, considerando el total de las mediciones, el ICE obtuvo 91 % de las mediciones clasificadas como aceptables, mientras que para el caso de Claro obtuvo un total de 70,57 % y Liberty un total de 70,24 %. Analizando los edificios por separado, el ICE solo es mejor para el edificio A. En el caso del edificio B, Claro e ICE obtuvieron alrededor de un 73 % de las mediciones como aceptables y Liberty un 66 %. En el caso del edificio C, tanto Claro como Liberty obtuvieron un 100 % de mediciones consideradas como aceptables mientras que el ICE un 92,31 %. Esto nos indica dos cosas. En general, el ICE tiene una mejor cobertura de 3G para el Hospital México. Sin embargo, solo es superior a los otros operadores en el edificio A.

A partir de un análisis más puntual, se destaca el caso del piso 6 en el edificio A, donde tanto Claro como Liberty obtuvieron los porcentajes de mediciones aceptables más bajos, siendo inferior a un 50 %. Otro piso de interés es el 3 del edificio B. En este piso el porcentaje de mediciones aceptables considerando los tres operadores fue de 59,82 %.

Para el caso de RSRP, los resultados muestran una disminución significativa en los porcentajes de mediciones aceptables al aplicar los criterios más estrictos definidos por la SUTEL. Considerando el total de las mediciones bajo el criterio internacional, Liberty fue el operador con mejor desempeño, alcanzando un promedio de 67,5 %, seguido por Claro con 44,6 % e ICE con 21,6 %. Sin embargo, al aplicar el umbral de calidad de SUTEL (≥ -95 dBm), los porcentajes se redujeron drásticamente: Liberty descendió a 54,6 %, Claro a 30,3 % e ICE a tan solo 7,3 %. Esto indica que, independientemente del criterio utilizado, Liberty se posiciona como el operador con mejor calidad de cobertura en interiores para la métrica RSRP en el Hospital México.

CUADRO I
PORCENTAJE DE MEDICIONES ACEPTABLES E RSCP PARA EL HOSPITAL MÉXICO

Liberty (%)	ICE (%)	Claro (%)	Piso o local	Edificio
53,85	96,97	61,54	1	A
63,64	100,00	60,78	3	A
80,00	100,00	84,21	4	A
62,07	100,00	70,97	5	A
48,93	100,00	27,78	6	A
64,00	100,00	50,00	7	A
82,61	80,00	80,96	PB	B
62,50	80,00	75,00	1	B
55,00	59,46	65,00	3	B
100,00	100,00	100,00	Farmacia	C
100,00	84,62	100,00	1	C

Analizando los edificios por separado, se observa que Liberty mantiene un desempeño relativamente estable en los edificios C y B, con porcentajes superiores al 66 % incluso bajo el criterio SUTEL. En contraste, ICE presenta una caída crítica en el edificio A, donde en varios pisos el porcentaje de mediciones aceptables fue del 0 %. Claro, por su parte, muestra un comportamiento intermedio, con caídas importantes, pero con algunos pisos donde supera el 70 % bajo el criterio internacional.

Un análisis más puntual revela que el piso 7 del edificio A es uno de los más críticos, donde tanto Claro como ICE obtuvieron un 0 % de cumplimiento bajo el criterio SUTEL, y Liberty apenas alcanzó un 10,53 %. Otro caso destacable es el piso 3 del edificio B, donde a pesar de que Liberty logró un 66,67 % de cumplimiento, ICE y Claro apenas alcanzaron un 25 % y 9,09 %, respectivamente, bajo el criterio SUTEL. Estos resultados evidencian que, aunque Liberty presenta una mejor cobertura relativa en 4G, la calidad del servicio en interiores sigue siendo deficiente cuando se aplican estándares más exigentes.

CUADRO II
PORCENTAJE DE MEDICIONES ACEPTABLES DE RSRP PARA EL
HOSPITAL MÉXICO SEGÚN DOS CRITERIOS

Liberty – SUTEL (%)	Liberty – Inter. (%)	ICE – SUTEL (%)	ICE – Inter. (%)	Claro – SUTEL (%)	Claro – Inter. (%)	Piso o local	Edificio
43,90	78,05	6,25	25,00	36,36	59,09	1	A
62,79	72,09	0,00	20,00	26,32	36,84	3	A
68,00	80,00	0,00	13,33	11,76	23,53	4	A
38,89	44,44	0,00	4,35	21,05	31,58	5	A
12,50	46,87	0,00	7,14	8,70	39,13	6	A
10,53	12,50	0,00	0,00	0,00	8,70	7	A
15,38	23,07	18,18	36,36	27,78	53,34	PB	B
41,67	56,25	0,00	31,25	29,17	71,03	1	B
66,67	83,34	25,00	50,00	9,09	22,73	3	B
100,00	100,00	25,00	25,00	30,95	38,01	Farmacia	C
98,08	100,00	8,33	27,78	73,81	92,94	1	C

Los resultados obtenidos para el caso del Hospital San Vicente de Paúl se muestran en el Cuadro 3, correspondiente a la métrica RSCP. Considerando el total de las mediciones, el operador ICE obtuvo el mayor porcentaje de mediciones clasificadas como aceptables con un 63,63 %, seguido muy de cerca por Claro con 62,55 %, mientras que Liberty alcanzó un 48,07 %. Analizando los edificios por separado, ICE fue el operador con mejor desempeño en todos los edificios, excepto en el edificio F, donde Liberty obtuvo el mayor porcentaje de cobertura aceptable. En el edificio A, tanto ICE como Claro superaron el 87 % de cumplimiento en todos los pisos, mientras que Liberty presentó valores críticos, especialmente en los pisos 2 y 3, con 20 % y 11,76 %, respectivamente. En los edificios B-C y D, ICE mantuvo una cobertura aceptable por encima del 76 % en varios

pisos, mientras que Liberty apenas alcanzó un 25 % en B-C y mostró caídas importantes en D. El edificio E fue uno de los más afectados: Claro registró un mínimo de 3,37 % en el piso 1, mientras que ICE y Liberty también presentaron valores bajos en varios niveles. En el edificio F, Liberty se destacó con un 92,59 %, superando ampliamente a ICE (16,33 %) y Claro (90 %).

A partir de un análisis más puntual, se destaca el caso del piso 3 del edificio A, donde Liberty obtuvo uno de los porcentajes más bajos (11,76 %), a pesar de que Claro e ICE alcanzaron el 100 %. Otro piso de interés es el piso 3 del edificio D, donde ICE no registró ninguna medición aceptable (0 %), y Claro y Liberty también mostraron valores bajos (21,88 % y 13,89 %, respectivamente). En contraste, el piso 4 del edificio A se presenta como un caso sobresaliente, donde los tres operadores superaron el 88 % de cobertura aceptable, evidenciando una zona con excelente calidad de señal.

CUADRO III
PORCENTAJE DE MEDICIONES ACEPTABLES DE RSCP PARA EL
HOSPITAL SAN VICENTE DE PAUL

Liberty (%)	ICE (%)	Claro (%)	Piso o local	Edificio
75,00	100,00	87,50	1	A
20,00	87,10	90,91	2	A
11,76	100,00	100,00	3	A
94,12	100,00	88,24	4	A
25,00	83,33	81,08	1	B-C
18,56	41,67	15,22	0	D
38,71	76,19	56,67	1	D
56,16	57,14	85,71	2	D
13,89	0,00	21,88	3	D
64,86	85,71	47,62	4	D
19,44	33,33	3,37	1	E
76,47	86,96	56,25	2	E
75,00	51,72	37,93	3	E
43,75	12,50	59,26	4	E
43,75	86,11	79,17	5	E
92,59	16,33	90,00	1	F

Los resultados obtenidos para el caso del Hospital San Vicente de Paúl se muestran en el Cuadro 4, correspondiente a la métrica RSRP. Considerando el total de las mediciones bajo el criterio internacional, el operador Liberty obtuvo el mayor porcentaje de mediciones clasificadas como aceptables con un 63,21 %, seguido por Claro con 46,00 % e ICE con 40,22 %. Al aplicar los criterios más estrictos definidos por la SUTEL (-95 dBm), los porcentajes se redujeron considerablemente: Liberty descendió a 37,43 %, ICE a 26,71 % y Claro a 17,53 %. Esto indica que, independientemente del criterio utilizado, Liberty se posiciona como el operador con mejor calidad de cobertura 4G en interiores para este hospital, mostrando mayor resiliencia frente a los estándares más exigentes.

Analizando los resultados por edificio, se observa que Liberty mantiene un desempeño relativamente superior en la mayoría de los pisos, especialmente en los edificios E y F, donde supera el 80 % bajo el criterio internacional. En contraste, ICE y Claro presentan caídas importantes en varios pisos, particularmente en los edificios D y E. En el edificio D, por ejemplo, ICE no superó el 10 % de cumplimiento en el piso 0, y Claro obtuvo un 0 % en el piso 3 bajo el criterio SUTEL. En el edificio E, aunque Liberty logró mantener valores aceptables en algunos pisos, Claro e ICE mostraron porcentajes muy bajos, incluso del 0 % en múltiples ubicaciones. A partir de un análisis más puntual, se destaca el caso del piso 3 del edificio D, donde los tres operadores presentaron valores críticos bajo el criterio SUTEL: Claro e ICE con 0 % y Liberty con apenas 7.69 %. Este piso representa una zona de alta probabilidad de fallas de conectividad. Por otro lado, no se identificaron pisos que cumplieran simultáneamente con más del 70 % de mediciones aceptables para los tres operadores bajo el criterio SUTEL.

CUADRO IV
PORCENTAJE DE MEDICIONES ACEPTABLES DE RSRP PARA EL HOSPITAL
SAN VICENTE DE PAUL, SEGÚN DOS CRITERIOS

Liberty – SU- TEL (%)	Liberty – In- ter. (%)	ICE – SUTEL (%)	ICE – Inter. (%)	Claro – SU- TEL (%)	Claro – Inter. (%)	Piso o local	Edificio
41,18	82,35	61,54	76,92	0,00	100,00	1	A
4,76	23,81	75,00	83,34	20,00	60,00	2	A
0,00	52,00	50,00	50,00	0,00	71,43	3	A
29,63	55,55	30,00	40,00	43,75	68,75	4	A
22,69	31,09	27,78	43,05	44,84	75,86	1	B-C
30,43	60,87	0,00	9,90	17,39	39,13	0	D
22,22	34,92	55,27	65,51	21,43	39,29	1	D
52,17	78,26	28,57	61,91	15,00	25,00	2	D
7,69	42,31	0,00	0,00	0,00	10,53	3	D
29,17	54,17	0,00	40,91	41,38	44,82	4	D
23,08	46,16	12,50	32,50	55,56	55,55	1	E
83,78	97,30	5,00	25,00	20,00	28,00	2	E
60,71	92,86	11,11	33,33	0,00	5,00	3	E
70,00	80,00	16,00	28,00	0,00	35,71	4	E
40,00	88,00	21,43	35,71	0,00	20,69	5	E
73,08	82,69	6,49	18,18	25,00	55,00	1	F

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la evaluación de cobertura celular en interiores de los hospitales Hospital México y Hospital San Vicente de Paúl evidencian que, si bien existen zonas con niveles aceptables de señal, la cobertura celular en interiores presenta deficiencias importantes, especialmente

bajo los criterios más exigentes definidos por la Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL), particularmente para la métrica RSRP (4G).

En términos generales, la métrica RSCP (3G) mostró un mejor desempeño en la mayoría de los edificios evaluados. En el Hospital México, el operador ICE presentó la mejor cobertura global en RSCP, con un 91 % de mediciones aceptables, siendo especialmente dominante en el edificio A. En el Hospital San Vicente de Paúl, ICE también lideró en promedio general (63,63 %) y fue el mejor operador en todos los edificios, excepto en el edificio F, donde Liberty obtuvo el mejor resultado. Sin embargo, al aplicar el umbral de calidad para RSRP (≥ -95 dBm), se identificaron zonas críticas con niveles de cumplimiento inferiores al 20 %, e incluso del 0 % en algunos pisos, lo cual representa una alta probabilidad de fallas de conectividad para los usuarios. En este contexto, Liberty demostró ser el operador más resiliente.

Se evidenció una marcada variabilidad entre operadores y entre edificios, lo que sugiere una falta de uniformidad en la planificación de la infraestructura de red móvil en interiores. En particular, ICE mostró un buen desempeño en 3G, pero una caída crítica en 4G bajo condiciones más restrictivas. Liberty, por su parte, aunque con menor cobertura en 3G, ofreció una cobertura 4G más robusta y consistente frente a los estándares más exigentes.

Estos hallazgos permiten concluir que la cobertura celular en interiores de centros hospitalarios no garantiza una conectividad eficiente y continua, lo cual puede afectar negativamente la operación de servicios clínicos, administrativos y de emergencia que dependen de la comunicación móvil, así como la conectividad de pacientes y acompañantes. La infraestructura actual no responde adecuadamente a las exigencias de calidad de servicio en entornos hospitalarios complejos, y se hace evidente la necesidad de fortalecer las soluciones de cobertura interior, como sistemas de antenas distribuidas o microceldas, especialmente en zonas críticas identificadas.

REFERENCIAS

- [1] T. S. Valley, A. Schutz, M. T. Nagle et al., “Changes to visitation policies and communication practices in Michigan ICUs during the COVID-19 pandemic,” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 202, n.o 6, págs. 883-885, 2020.
- [2] S. J. Moss, K. D. Krewulak, H. T. Stelfox et al., “Restricted visitation policies in acute care settings during the COVID-19 pandemic: a scoping review,” *Critical Care*, vol. 25, págs. 1-12, 2021.
- [3] C. C. Shao, “Patient visitation—A call for standardization and liberalization,” *The American Journal of Surgery*, vol. 223, n.o 2, págs. 428-429, 2022.
- [4] C. Tudor, “The impact of the COVID-19 pandemic on the global web and video conferencing SaaS market,” *Electronics*, vol. 11, n.o 16, pág. 2633, 2022.
- [5] S. Ganeshan, E. Hsiang, T. Peng et al., “Enabling patient communication for hospitalised patients during and beyond the COVID-19 pandemic,” *BMJ innovations*, vol. 7, n.o 2, 2021.
- [6] F. Sasangohar, A. Dhala, F. Zheng, N. Ahmadi, B. Kash y F. Masud, “Use of telecritical care for family visitation to ICU during the COVID-19 pandemic: an interview study and sentiment analysis,” *BMJ quality & safety*, vol. 30, n.o 9, págs. 715-721, 2021.

- [7] QMC Telecom, Estudio de caso: experiencia de QMC en hospitales, Consultado el 24 de mayo de 2025, 2021. dirección: <https://blog.qmctelecom.co/estudio-de-caso-experiencia-de-qmc-en-hospitales/>.
- [8] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical layer; Measurements (FDD),” ETSI, ETSI Technical Specification TS 125 215, ver. 16.0.0, 2020. dirección: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/125200_125299/125215/16.00.00/60/ts125215v160000p.pdf.
- [9] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 17.0.0 Release 17),” ETSI, ETSI Technical Specification TS 136 214, ver. 17.0.0, 2022. dirección: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136214/17.00.00_60/ts_136214v170000p.pdf.
- [10] Superintendencia de Telecomunicaciones (SUTEL), RCS-152-2017: Umbrales de cumplimiento para los indicadores establecidos en el Reglamento de Prestación y Calidad de Servicios (RPCS), Disponible en línea, Resolución publicada en el Alcance N.º 141 a La Gaceta N.º 179 del 14 de junio de 2017, 2017. dirección: https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=84229&nValor3=108604¶m1=NRTC&strTipM=TC.

Control por Matriz Dinámica para el control de la anestesia y las variables hemodinámicas

Dynamic Matrix Control for the control of anesthesia and hemodynamic variables

Ing. Mercedes Chacón Vásquez, PhD.

*Investigadora, Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab),
Universidad de Costa Rica*

e-mail: mercedes.chaconvasquez@ucr.ac.cr

Gabriel González Rivera

Estudiante, Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

e-mail: gabriel.gonzalezrivera@ucr.ac.cr

Dilana Rodríguez Jiménez

Estudiante, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica

e-mail: dilana.rodriguez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Controlador de anestesia, Control predictivo por matriz dinámica, Desempeño, Dosificación de fármacos, Variables hemodinámicas.

Keywords:

Anesthesia controller, dynamic matrix predictive control, performance, drug dosing, hemodynamic variables.

RESUMEN

Se presenta el estudio de un caso de control de lazo cerrado multivariable para un sistema de anestesia y utilizando variables hemodinámicas aplicadas a un controlador predictivo de matriz dinámica. La automatización de la administración de fármacos es de gran importancia para la industria médica, pero representa un gran reto debido a la no linealidad, retrasos variables, la variación de la dinámica según los fármacos específicos y la seguridad del paciente. En este artículo se presentan los detalles del diseño del control de cuatro variables durante el suministro de la anestesia que son el índice bispectral, la presión arterial media, el gasto cardíaco y la escala de agitación-sedación de Richmond. La aplicación utiliza un modelo de la respuesta del paciente a la administración de los fármacos y tiene en cuenta las características fisiológicas de casos clínicos disponibles. Además, se muestran simulaciones y el rendimiento del lazo cerrado, en el que se cuantifican los índices clínicos de cada variable. Los resultados indican la capacidad del sistema para garantizar la estabilidad mientras presenta un desempeño aceptable en el seguimiento de los valores de referencia del índice bispectral, la presión arterial media y en el rechazo de perturbaciones.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación busca contribuir a la optimización de las tecnologías de control de dosificación de fármacos en los procesos de anestesia de la industria médica. Para conseguir este objetivo, es imprescindible comprender el proceso que recorren los fármacos antes de ser aceptados y aplicados en contextos clínicos. Principalmente, al analizar una molécula farmacológica, esta debe atravesar diversas etapas antes de su aprobación para uso clínico. Una de las más relevantes es la fase preclínica, en la cual se evalúan aspectos como la toxicidad, la farmacocinética, farmacodinámica y la eficacia del compuesto en modelos animales, generalmente en ratas o ratones. Superada esta etapa, se procede a la investigación clínica en humanos, llamada estudios clínicos. Estos ensayos clínicos se realizan en distintos centros hospitalarios y permiten examinar la seguridad y eficacia del fármaco a nivel poblacional. La inclusión de una muestra diversa en cuanto a edad, género, etnia y condiciones de salud es fundamental para analizar cómo varía la respuesta fisiológica y los efectos adversos del medicamento entre distintos individuos [1]. Este desarrollo es primordial en el contexto de la anestesia, donde una dosificación inadecuada de estos fármacos puede conllevar riesgos clínicos notables, como hipotensión, sedación excesiva, despertar intraoperatorio o bradicardia. Por ello, se resalta la importancia de contar con un control preciso, individualizado y seguro de los indicadores fisiológicos de cada paciente.

En este contexto, durante la anestesia se requieren múltiples indicadores utilizados para resguardar el bienestar del paciente, cada uno asociado con un fármaco. En este trabajo se estudian cuatro casos clave: la administración de propofol, utilizando el índice bispectral (BIS) como variable controlada, es una medida disponible comercialmente de los efectos de los anestésicos y sedantes en el cerebro, basada en un análisis bispectral del electroencefalograma; el remifentanil, es un analgésico cuya dosificación se mide con la escala de agitación-sedación de Richmond (RASS). Para el sistema hemodinámico se administra dopamina (DP) mediante el monitoreo de la presión arterial media (MAP); y el nitroprusiato de sodio (SNP) que es un vasodilatador arteriovenoso cuya eficacia se evalúa a través del gasto (CO). Cabe destacar la interacción entre las señales de salida y los fármacos aplicados, el cual implica una coordinación en el control y precisión de los sistemas involucrados.

Además, la respuesta no lineal del paciente a la infusión de los fármacos representa un reto importante. Así como los requerimientos del sistema de control de alcanzar el valor deseado lo más rápido posible, sin sobrepaso y mantener el sistema regulado. Por lo tanto, desde el punto de vista de la ingeniería de control, el control predictivo basado en modelo (MPC) ofrece soluciones óptimas y robustas [2], [3], [4], [5], [6]. De todos los tipos de control predictivo, el DMC tiene la ventaja de optimizar el proceso mediante el uso de una matriz dinámica que se obtiene de una curva reacción, lo cual lo hace más atractivo para aplicaciones industriales. Por ello, en este trabajo se implementa una estrategia de control predictivo, para la dosificación de los fármacos. Los resultados se comparan con los expuestos en la literatura para un algoritmo MPC.

III. METODOLOGÍA

A. Modelo farmacocinético y farmacodinámico

El modelo del paciente ante la aplicación de los cuatro fármacos se encuentra en [7]. En la práctica clínica, los modelos farmacocinéticos se estudian como compartimentos o ecuaciones diferenciales que describen cada la acción en la sangre, el músculo y la grasa. En (2) x_1 es la concentración en el compartimento de la sangre, x_2 y x_3 denotan las concentraciones en músculo y grasa, respectivamente. Además, las constantes k_{ij} representan la velocidad de transferencia de la cantidad de fármaco del compartimento i-ésimo al compartimento j-ésimo, y por otro lado, es la representación de la dinámica del fármaco, como se muestra a continuación:

$$\dot{x}_e(t) = -k_{e0}x_e(t) + k_{1e}x_1(t) \quad (1)$$

Donde k_{e0} representa la tasa metabolización del fármaco en el cuerpo del paciente y k_{1e} muestra la transferencia desde la sangre al compartimiento de efecto para cada fármaco. Todo lo anterior plasma el modelo farmacocinético de compartimientos y se define de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(k_0 + k_{12} + k_{13}) & k_{21} & k_{31} & 0 \\ k_{12} & -k_{21} & 0 & 0 \\ k_{13} & 0 & -k_{31} & 0 \\ k_{1e} & 0 & 0 & -k_{e0} \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (2)$$

$$y(t) = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_e(t) \end{bmatrix}$$

A este modelo se agregan funciones para simular la administración de cada fármaco, así como perturbaciones por los estímulos que ocurren durante la cirugía. A partir del modelo de cada fármaco, se obtiene una curva reacción para cada salida, variando la señal de entrada del fármaco correspondiente y se procede a diseñar el controlador. Asimismo, con las ecuaciones 3 y 4 nos permite conocer la tasa metabólica en función de la masa corporal magra para mujer y hombre respectivamente. El LBM se emplea en el cálculo de los parámetros como la tasa metabólica de eliminación del fármaco, siendo este importante para la distribución y eliminación de agentes anestésicos.

$$\text{LBM} = 1,1 \cdot \text{peso} - 128 \cdot \left(\frac{\text{peso}}{\text{altura}} \right)^2 \quad (3)$$

$$\text{LBM} = 1,07 \cdot \text{peso} - 148 \cdot \left(\frac{\text{peso}}{\text{altura}} \right)^2 \quad (4)$$

Un aspecto relevante a mencionar en el modelo farmacodinámico, es la respuesta dosis-efecto

que se denota con la ecuación no lineal de Hill. Esta fórmula se emplea para modelar fármacos individuales, además, conduce la relación de las concentraciones plasmáticas del fármaco y la magnitud del efecto que produce.

$$E = E_0 - \frac{E_{max} x_e^y}{C_{50}^y + x_e^y} \quad (5)$$

Para la magnitud de las variables, se sabe que el BIS se mide en un rango entre 100 % y 0 %, donde 60 % indica un estado de anestesia general asociado a hipnosis profunda. El RASS se debe mantener en valores negativos; un rango de -3 a 0 representa una sedación moderada, mientras que en -4 a -5 se considera una sedación profunda. El MAP debe situarse entre 65 y 110 mmHg. Finalmente, el CO debe estar entre 4,5 y 5,5 L/min, y que representa el volumen de sangre que bombea el corazón en un minuto [8].

B. DMC

El Control por Matriz Dinámica (DMC) es un método de control predictivo basado en modelo que usa la respuesta escalón del sistema para predecir su comportamiento futuro. Posee una gran ventaja en los sistemas multivariados con retardos y acoplamientos, como en nuestro caso en la administración de fármacos. Además, la finalidad es disminuir los errores futuros y prevenir las variaciones violentas en las señales de control, lo que suele ser complejo en aplicaciones médicas principalmente para evitar sobredosificación [9]. La función de costo de control DMC viene dada por:

$$J = \sum_{j=1}^p [\hat{y}(t+j|t) - r(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (6)$$

Donde $\hat{y}$ es la predicción de las salidas, r son las referencias futuras para las variables controladas, p es el horizonte de predicción, m es el horizonte de control, y λ es el peso de los esfuerzos de control. Las ecuaciones de predicción vienen dadas por:

$$\hat{y}(t+k|t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) + \hat{n}(t+k|t) \quad (7)$$

La primera parte es un modelo de respuesta a una entrada tipo escalón, $\hat{n}$ son las perturbaciones previstas por los estímulos durante la cirugía. Los valores de la respuesta escalón se obtienen del modelo a lazo abierto. La función cuadrática puede expresarse como:

$$J = \frac{1}{2} u^T H u + f^T u \quad (8)$$

Las ecuaciones de predicción se extendieron al caso MIMO y se resolvió el problema de

optimización con restricciones en Matlab usando el comando quadprog. Donde H es una matriz definida como $H=(G^T G+\lambda I)$, donde la matriz G contiene los coeficientes de la respuesta al escalón de cada entrada de control. Y es la matriz de la respuesta libre dada por $f=2(M_f \Delta u + y_f - r) G$.

IV. RESULTADOS

El presente análisis aborda el comportamiento del lazo de control multivariable, en el cual fue posible de cerrar exitosamente. Simultáneamente, se logra controlar el BIS, el MAP, el CO y el RAAS mediante las señales de dosificación del propofol, remifentanilo, dopamina y SNP, respectivamente. El intervalo deseado de valores del BIS es [40 %,60 %], mientras que el valor de referencia de los demás es MAP= 80 mmHg, CO=5 L/min, y RAAS= -4. Las simulaciones se realizan considerando un perfil de paciente de 74 años y 88 kg proporcionados [7]. Según [8], el CO debe estar en un intervalo de 65 - 110 ml/kg*min, lo que implica un rango deseado sería 5.72 L/min a 9.68 L/min para el paciente 1 de 88 kg y 164 cm. Los parámetros de ajuste del controlador fueron: un tiempo de muestreo de s , un horizonte de control de s , y un horizonte de predicción de $T_s=1$. Las señales de control se restringieron de la siguiente manera: $u_{\min p}=0, u_{\max p}=3,5, u_{\min r}=0, u_{\max r}=2,5, u_{\min d}=0, u_{\max d}=10, u_{\min s}=0$ y $u_{\max s}=10$. Los parámetros del controlador se ajustaron empleando una medida de error del desempeño, medido entre la señal obtenida y la deseada como σ . En las figuras 1 y 2 se muestran las simulaciones con las respuestas del sistema anestésico-hemodinámico para un funcionamiento del lazo de control de seguimiento de los valores deseados.

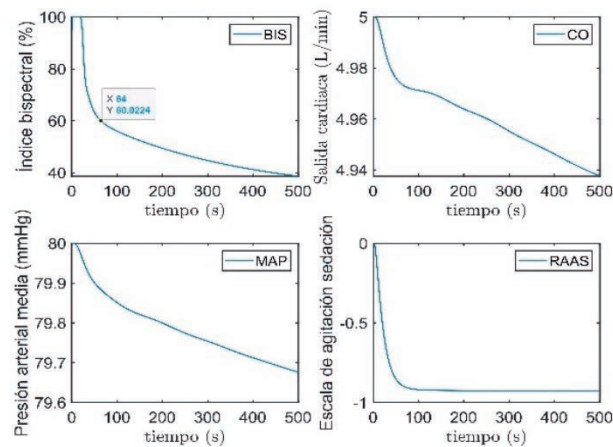


Fig. 1. Simulación de la respuesta del paciente de 74 años.

En la figura 1 se aprecia el comportamiento a lo largo del tiempo de las variables fisiológicas: el índice bispectral (BIS), la presión arterial media (MAP), el gasto cardíaco (CO) y la escala de agitación-sedación de Richmond (RASS). Gracias a la influencia del DMC, la mitad de las variables logran seguir sus valores deseados. En el caso del BIS, se percibe una señal con conducta descendente partiendo del estado de conciencia hasta el intervalo de anestesia general [40 %, 60 %].

El cambio se desarrolla de manera gradual y sin oscilaciones, siendo relevante para eludir efectos inoportunos como el despertar intraoperatorio o la hipnosis. Para el MAP, se observa como su trayectoria se encuentra dentro del rango normal [70-100]mHg. Aunque este va decayendo, se percibe una proyección de asentamiento en uno de los valores de los intervalos. Si este se encontrase en el rango de [60-65]mHg, se recibe suficiente sangre en los órganos. Por su parte, el RASS y el CO no poseen el comportamiento deseado. En cuanto a la variable RASS se mantiene estable a -1, lo que significa que se encuentra en el término somnoliento. Pero este nivel no es el adecuado para una operación, donde se necesita un valor de sedación entre -4 o -5. En uno de los escenarios más críticos el CO, no cumple con el rango necesario de [5.72-9.68]L/min, pero la señal conseguida empieza desde 5L/min y descende. Este comportamiento indica que el corazón no está bombeando suficiente sangre y pone en riesgo la vida del paciente.

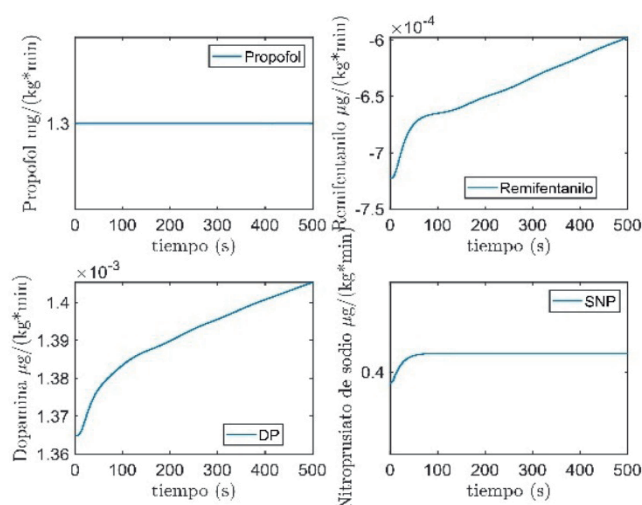


Fig. 2. Señal de control de la administración de fármacos.

En la figura 2 se observa la señal de control correspondiente a la administración de los fármacos. En la gráfica del propofol se aprecia que se mantiene constante, lo cual se considera correcto y coherente el resultado dado al buen control del BIS. En contraste, las señales de las dosis de remifentanilo y dopamina crecen, lo que indica un esfuerzo del controlador por llegar a las referencias de RASS y CO, respectivamente. Al no conseguir los valores deseados, se plantea que la modificación de las señales no es adecuada para equilibrar la dinámica del sistema. Por otro lado, SNP posee una gráfica que rápidamente se estabiliza, lo cual concuerda con la conducta aceptable del MAP. Si se analiza en conjunto las señales, se ve que estas son suaves y sin oscilaciones, pero no todas consiguen un control eficaz y lo que muestra las limitaciones del controlador. Existe un acoplamiento fuerte y dinámico entre los distintos subsistemas de anestesia y hemodinámica. Es una limitación que no disponen de los modelos de las funciones de interacción entre las distintas salidas del sistema, ya que se podrían incorporar en la matriz de predicción del DMC y optimizar los resultados tomando en cuenta estas interacciones. A pesar de estas limitaciones, el control de la administración de los fármacos utilizando el DMC es apto

para una anestesia estable, incluso para pacientes críticos con problemas cardíacos. Sin embargo, en este caso, la señal de CO no logra mantenerse dentro del rango deseado, lo que enfatiza a la mejorar de coordinación entre variables.

CUADRO I
ÍNDICES DE DESEMPEÑO DEL BIS

t_o (s)	low (%)	t_a (s)	US (%)
64	38.61	50	1.9

En la CUADRO I se miden los índices de desempeño del BIS. El tiempo para alcanzar por primera vez el intervalo objetivo de valores (t_o); el valor más bajo observado durante la fase de inducción (low); el tiempo de asentamiento en el intervalo de referencia, definido dentro de $\pm 5\%$ (t_a); y el subimpulso (US) definido como el valor que supera el límite del intervalo definido. Los valores encontrados coinciden con los tiempos aceptados en la literatura [3], [6], [8], [10]. Para evaluar la respuesta del funcionamiento del lazo cerrado como regulador, se agregó una señal de estímulo durante la cirugía como perturbación y se midió el efecto en el BIS.

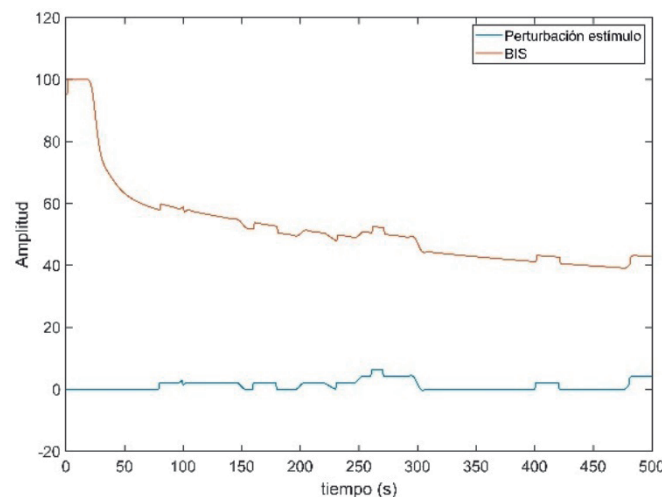


Fig. 3. Respuesta del BIS ante estímulos.

En la Fig. 3 se observa que el índice bispectral (BIS) es controlado por el agente hipnótico Propofol y como este posee una buena capacidad de rechazo frente a las perturbaciones. Esto se debe a la respuesta de una pequeña desviación ante una perturbación y como la señal se recupera ágilmente.

CONCLUSIONES

Se logra implementar un lazo de control para un sistema multivariable anestésico-hemodinámico. Este sistema facilita la regulación de las variables fisiológicas de manera simultánea, por

medio de la administración de fármacos. Se muestran los índices de desempeño y estos se encuentran en valores casi aceptados a la literatura, particularmente en el BIS, donde se percibe el control adecuado en condiciones normales y ante perturbaciones. Las simulaciones muestran un seguimiento aceptable del valor deseado de cada variable controlada y el rechazo de estímulos durante la cirugía. Aunque, algunas variables como el RASS y el CO no alcanzan las referencias deseadas, lo que indica la limitación de control multivariable del sistema con fuerte presencia de interacciones entre sus variables. Para trabajos futuros se desean explorar técnicas de desacoplamiento para reducir la fuerte interacción del sistema. De este modo, se contribuiría a una mejor representación de las interacciones entre las variables fisiológicas, lo que permitiría mejorar el desempeño del controlador DMC y extender su uso con pacientes con contextos clínicos complejos.

REFERENCIAS

- [1] J. R. Jiménez, Aplicación de fármacos en la industria, Entrevista, 15 de mayo, 2025.
- [2] A. R. Ynineb, H. Farbakhsh, G. Ben Othman et al., “Comparative Analysis of Pharmacokinetic-Pharmacodynamic Models for Propofol and Remifentanyl Using Model Predictive Control”, en 2024 European Control Conference (ECC), 2024, pp. 3045-3050. DOI: 10.23919/ECC64448.2024.10590766.
- [3] A. Pawlowski, M. Schiavo, N. Latronico, M. Paltenghi y A. Visioli, “Linear MPC for anesthesia process with external predictor”, *Computers & Chemical Engineering*, vol. 161, 2022. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107747.
- [4] S. Ntouskas y H. Sarimveis, “A robust model predictive control framework for the regulation of anesthesia process with Propofol”, *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 42, no. 4, pp. 965-986, 2021. <https://doi.org/10.1002/oca.2710>. eprint:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/oca.2710>
- [5] O. Sandre-Hernandez, M. Ramírez-Barrios, P. Ordaz y M. Mera, “Multivariable discrete MPC with exponential cost function on the automation of the anesthesia process”, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, DOI: <https://doi.org/10.1002/rnc.7025>.
- [6] M. L. R. Álvarez-Ossorio, “Control Predictivo para la Gestión Segura de la Anestesia”, Universidad de Sevilla, 2024.
- [7] C. M. Ionescu, M. Neckebroek, M. Ghita y D. Copot, “An Open Source Patient Simulator for Design and Evaluation of Computer Based Multiple Drug Dosing Control for Anesthetic and Hemodynamic Variables”, *IEEE Access*, vol. 9, p.ágs. 8680-8694, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049880.
- [8] A. Maxim y D. Copot, “Closed-loop control of anesthesia and hemodynamic system: a Model Predictive Control approach”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 15, pp. 37-42, 2021, 11th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems BMS 2021, ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.228>.
- [9] J. E. Ali, E. Feki y A. Mami, “Dynamic Matrix Control DMC using the Tuning Procedure based on First Order Plus Dead Time for Infant-Incubator”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 10, no. 6, pp. 370-376, 2019. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100646.
- [10] N. Paolino, M. Schiavo, N. Latronico, M. Paltenghi y A. Visioli, “PK/PD model based design of PID control for closed-loop anesthesia”, *IFAC Journal of Systems and Control*, vol. 27, pp. 100-247, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2024.100247>. <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2024.100247.com/science/article/pii/S2468601824000087>.

Avances en ciencias de datos

Diseño de un sistema de comunicación OpenSource y de bajo costo para una Estación de Trabajo Experimental

Design of an Open-Source and Low-Cost Communication System for an Experimental Workstation

Yexon Abraham Espinoza Carvajal

Estudiante, Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

email: yexon.espinoza@ucr.ac.cr <https://orcid.org/0000-0001-9713-3261>

Helber Menesses Navarro Profesor

Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

email: helber.meneses@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-7119-3100>

Hanzel Grillo Espinoza Profesor

Ingeniería Industrial Universidad de Costa Rica

email: hanzel.grillo@ucr.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-8621-930X>

Palabras clave:

Sistema de comunicación, Automatización, OpenSource, Bajo costo, Raspberry Pi, Arduino, TCP/IP, Interfaz gráfica, Estación de Trabajo.

Keywords:

Communication system, Automation, Open source, Low cost, Raspberry Pi, Arduino, TCP/IP, Graphical interface, Workstation.

I. INTRODUCCIÓN

The advent of the fourth paradigm of science, centered on data-driven discovery, has transformed the way materials are analyzed and designed. Building upon the first three paradigms—experimental (empirical), theoretical (model-based), and computational

En los últimos años, el avance, desarrollo y la accesibilidad de microcontroladores y microcomputadores de bajo costo, han impulsado el desarrollo de proyectos en diversas áreas, incluyendo el control y la automatización [1]. Un sistema de control y automatización suele estar compuesto por múltiples unidades de control encargadas de gestionar sectores específicos del sistema. Estas unidades deben poder comunicarse entre sí o con otro controlador principal, que se encarga de coordinar todo el proceso a un nivel superior. Para facilitar esta comunicación, se han desarrollado diversos protocolos, como TCP/IP, I2C, SCI, SPI y UART, cada uno con características particulares, pero con el mismo propósito: la transferencia eficiente de información entre dispositivos [2] [3].

En este contexto, la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad de Costa Rica desarrolla una Estación de Trabajo Experimental en el Laboratorio de Ingeniería de Factores Humanos. Esta estación está destinada a la evaluación e investigación en el campo de métodos de trabajo de la industria 4.0, permitiendo la realización de prácticas, simulaciones y experimentos.

La simulación de actividades de ensamble, así como la definición, evaluación y medición del contenido de trabajo de las mismas, es inherente al quehacer cotidiano de la Ingeniería Industrial, y una área en constante transformación debido a la disponibilidad de nuevas tecnologías. El estudio sistemático de trabajo consiste en el registro y examen crítico de los modos de realizar actividades, con el fin de efectuar mejoras (Kanawaty 2008).

La inspección automática es una de las primeras herramientas (que aún continúa teniendo muchos retos) para la integración del trabajo de los humanos con el de las máquinas en la industria. Se pretende que los sistemas puedan identificar, por sí solos, partes de las piezas y el método de ensamble, para lo cual, el aprendizaje se convierte en un aspecto fundamental en el contexto de la Cuarta Revolución Industrial y los sistemas de manufactura inteligentes (Joyanes, 2017). En esta estación de trabajo se pretende desarrollar un ambiente de experimentación que facilite la integración de actividades de ensamble manuales, con alternativas de automatización, control automático y eventualmente implementación de inteligencia artificial para el monitoreo de las tareas, lo cual facilitaría la toma de decisiones en el control e identificación de errores en tiempo real. Al tratarse de una instalación con un fin didáctico, pero con potencial desarrollo a nivel industrial, es particularmente importante procurar la minimización del costo en las implementaciones toda vez que sean funcionales y logren su objetivo. Según Ferreiro y Sierra (2012), estos procesos de inspección pueden ser realizados usando sensores sencillos (peso, color, tamaño, etc.) (Fast-Berglund et al. 2013), o mediante tecnologías avanzadas como la visión por computador. En este caso, es posible la identificación de variables de calidad del producto y las acciones de ensamble realizadas mediante el uso de visión por computadora (Agin 1980, Wu et al. 2020).

Teniendo en cuenta que la estación de trabajo busca contribuir a al estudio de métodos de trabajo apoyado en sistemas inteligentes, propios de la Industria 4.0, y para que sea factible la implementación de monitoreo en tiempo real a través de visión por computadora, es imprescindible apoyarse en el concepto de automatización (Karekatti 2021), particularmente para el movimiento de materiales y equipos dentro de la estación de trabajo y entre estaciones de trabajo. De ahí surge la necesidad de automatizar estos movimientos, de una manera interactiva con la persona que trabajará en cada estación de trabajo, con el objetivo de priorizar la medición y control de lo que ocurre en cada estación, a la vez que el conjunto es capaz de recrear un sistema de trabajo real, con continuidad en la producción. El trabajo realizado en el presente artículo se enfoca en lograr la automatización de los transportes de materiales e insumos en la estación de trabajo, utilizando componentes de bajo costo, que faciliten la interacción con la persona durante la secuencia de ensamble, y controlados de manera centralizada mediante software diseñado a la medida.

La estación consta de ocho puestos de trabajo, donde los estudiantes desempeñan el rol de operarios, ejecutando distintas etapas de ensamblaje que da como resultado un producto final terminado.

Para facilitar este proceso, se encuentra en desarrollo un sistema de transporte de piezas basado en dos bandas transportadoras con rampas de carga y descarga.

Cada uno de los puestos de trabajo es gestionado por un Raspberry Pi, las cuales se comunican con un computador central que ejecuta un programa encargado de coordinar todo el proceso de transporte. En este artículo, se desarrolla el sistema de comunicación que permite la integración de ocho Raspberry Pi y un Arduino con el computador principal.

Hasta el momento, no se ha encontrado documentación sobre el desarrollo de un sistema de comunicación específicamente diseñado para un sistema de transporte automatizado en una estación de trabajo experimental de estas características. Este proyecto ha iniciado desde cero, abarcando el diseño e implementación de todos los mecanismos utilizados y con un sistema de transporte adaptado a necesidades particulares.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción de la Estación de Trabajo Experimental

La Estación de Trabajo Experimental, ilustrada en las Figuras 1a y 1b, está construida con perfiles de aluminio y cuenta con ocho mesas o puestos de trabajo. En la parte central se ubican dos bandas transportadoras, mientras que las mesas están distribuidas lateralmente, con cuatro mesas a cada lado.

Esta estación permite que hasta ocho operarios trabajen simultáneamente en procesos o prácticas que simulan entornos reales de producción industrial. Las bandas transportadoras facilitan el intercambio de piezas subensambladas entre los operarios, permitiendo el envío y la recepción de elementos entre cualquiera de los puestos de trabajo. Esto es posible gracias a la implementación del hardware detallado en la Tabla 1. El Arduino Micro se encarga de gestionar el movimiento de las bandas, pero requiere comunicarse con el controlador central a través del módulo ESP8266, el cual transmite las instrucciones relacionadas con el sentido de giro y la velocidad de operación [4].

CUADRO I
ELEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL DE BANDAS TRANSPORTADORAS

Componente	Función
Arduino Micro	Controlador movimiento bandas
ESP8266	Comunicación Wi-Fi con controlador central
Driver DM860H - Banda Superior	Control de motor paso a paso
Driver DM860H - Banda Inferior	Control de motor paso a paso
Motor Paso a Paso (Nema 23) - Banda Superior	Movimiento mecánico
Motor Paso a Paso (Nema 23) - Banda Inferior	Movimiento mecánico
Fuente 48VDC	Alimentación de los drivers

En la Figura 1c se muestra una rampa de envío y recepción, encargada de incorporar o retirar las bandejas que contienen los elementos a intercambiar. Cada bandeja está identificada mediante un código QR que permite su rastreo y la rampa está equipada con el hardware detallado en la Tabla 2. En cada puesto de trabajo se disponen dos rampas (una por banda), las cuales son gestionadas mediante una Raspberry Pi que incluye una pantalla con una interfaz gráfica para su operación.

La Raspberry Pi se comunica con el controlador central para recibir instrucciones relacionadas con la operación de las bandejas, tales como el momento de recepción, el identificador de la bandeja y la rampa asignada para dicha acción. En caso de realizar un envío, la Raspberry Pi debe solicitar autorización al controlador central, quien valida y autoriza el procedimiento en el momento oportuno.

Este intercambio de información es esencial para el funcionamiento coordinado de toda la estación, ya que existen ocho Raspberry Pi (una por cada puesto de trabajo) que deben interactuar continuamente con el controlador central para asegurar una operación fluida y sincronizada.

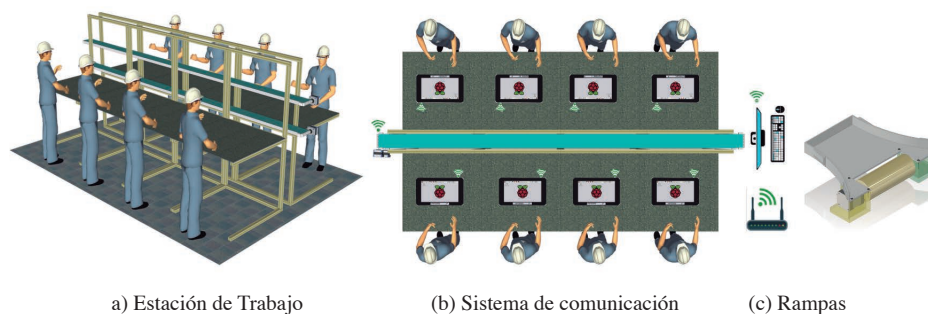


Fig. 1. Estación Experimental de Trabajo que incluye el sistema de comunicación y las rampas de envío y recepción.

CUADRO II

HARDWARE INSTALADO EN CADA UNA DE LAS RAMPAS DE ENVÍO Y RECEPCIÓN

Componente	Función
Sensor QR MH-ET LIVE Scanner v3.0	Lectura de códigos QR de bandejas
2 Sensores Infrarrojo (IN/OUT)	Detección de entrada/salida de bandejas
Sensor Infrarrojo (Enable)	Detección de presencia de bandeja en la rampa
Servo motor DSSERVO DS3235sc,	Encargado de retirar las bandejas de la banda transportadora
Driver TB6600	Control del motor paso a paso
Motor Paso a Paso (Nema 17)	Encargado de incorporar las bandejas a las bandas transportadoras
Fuente 24VDC	Alimentación del driver
Fuente 5VDC	Alimentación de la lógica de control y sensores

B. Elementos del sistema de comunicación

En la Figura 1b se muestran todos los elementos que conforman el sistema de comunicación. Se compone de ocho Raspberry Pi, un Arduino al que se le ha incorporado un módulo ESP8266 para habilitar la conexión a una red Wi-Fi, y una computadora de escritorio (PC).

El programa principal se ejecuta en la PC, y para poder gestionar toda la estación, debe comunicarse de forma inalámbrica con los demás elementos a través de una red Wi-Fi local. Esta configuración no solo reduce significativamente el cableado, sino que además permite ubicar la PC en una sala de control independiente, mejorando la organización y el acceso al sistema de supervisión.

C. Interfaces gráficas

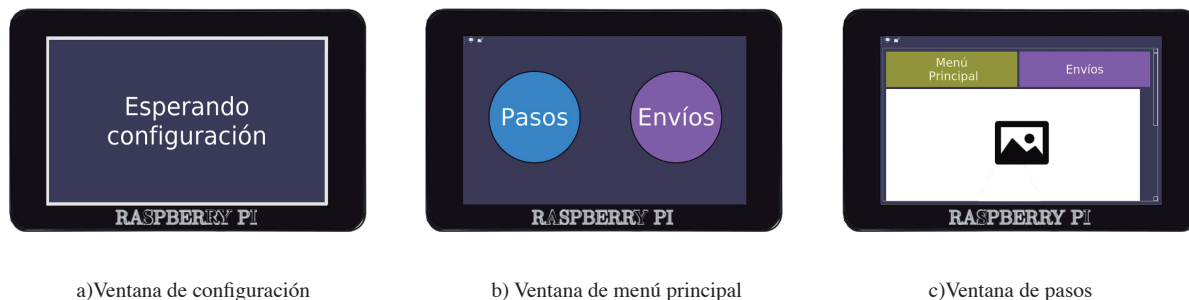
La interfaz gráfica es el medio que le permite al usuario interactuar con la estación de trabajo. En este caso se crearon dos interfaces, una interfaz para operar en cada una de las Raspberry PI y otra interfaz para el programa principal.

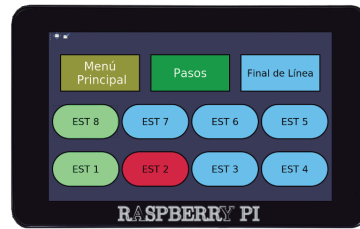
Interfaz para Raspberry PI

En la Figura 2 se muestran las diferentes pantallas creadas. La ventana de configuración se utiliza siempre que la estación no esté operando o esté detenida. La ventana de menú principal se muestra una vez que desde el programa principal la estación es puesta en marcha, desde esta pantalla se puede navegar a la ventana de pasos y a la ventana de envío. En la ventana de paso se muestra alguna información relevante para el rol que desempeña el operario. La ventana de envíos es mucho más compleja, dado que los botones EST le permiten al usuario seleccionar el destino al que desea hacer el envío, además, este conjunto de botones es totalmente configurables dependiendo de la configuración hecha desde el programa principal, su orden, su color y su habilitación, depende de los parámetros de configuración [5].

Interfaz del programa principal

En la Figura 3 se muestra la interfaz del programa principal. Contiene una serie de parámetros que permiten configurar la estación en función del orden y número de operarios que participarán, además, permite definir la dirección y la velocidad de las bandas transportadoras.





d) Ventana de envíos

Fig. 2. Interfaz gráfica para las Raspberry Pi ubicadas en cada puesto de trabajo.

Ambas interfaces fueron desarrolladas con la librería PyQt5 y su diseño se hizo con QT Designer.

D. Sistema de comunicación

La topología implementada es un sistema de comunicación bidireccional de tipo estrella, en el cual un elemento centralizado de comunicación —en este caso, una PC— se conecta con todos los demás dispositivos. En total, diez elementos interactúan y se comunican a través de una red Ethernet inalámbrica (Wi-Fi).

Para establecer la comunicación entre el controlador central (PC), el Arduino y las ocho Raspberry Pi, es necesario que todos los dispositivos puedan conectarse a una red Wi-Fi. Tanto la PC como las Raspberry Pi cuentan con conectividad inalámbrica incorporada, ya que son computadores. Sin embargo, el Arduino Micro, al ser un microcontrolador, no dispone de esta capacidad de forma nativa.

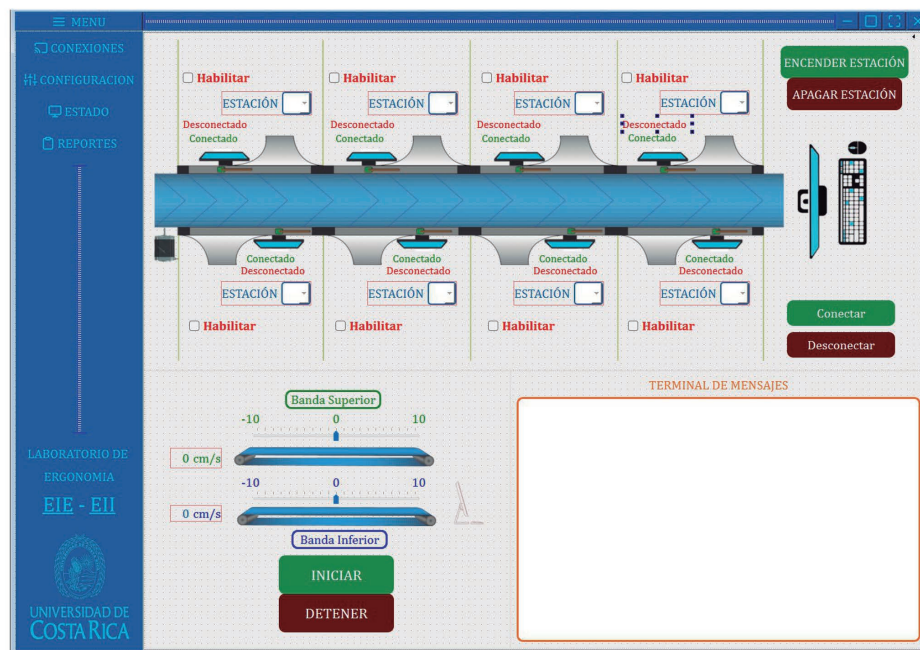


Fig. 3. Interfaz gráfica del controlador central.

Para solucionar esto, se incorporó un módulo ESP8266, un microcontrolador diseñado para conectar dispositivos a Internet. Este módulo se comunica con el Arduino a través de su puerto serial: cualquier mensaje recibido por el ESP8266 se reenvía al Arduino, y todo mensaje enviado por el Arduino a través del puerto serial es transmitido por el ESP8266 hacia el controlador central.

Todos los dispositivos se configuran para conectarse automáticamente a la misma red Wi-Fi. La comunicación se establece mediante un protocolo cliente-servidor, implementado con la librería “socket” de Python, que permite programar tanto el servidor como los clientes necesarios para el intercambio de datos entre el controlador central, las Raspberry Pi y el Arduino.

Servidor

Se crea una clase llamada Server, su constructor recibe dos parámetros, el host (servidor) y el port (puerto), que son utilizados para crear el socket de comunicación.

La identificación y registro de los clientes puede hacerse de varias formas, entre las que están dirección IP, hostname (nombre del servidor), entre otras. En este caso se utiliza el hostname, de manera que a cada Raspberry se le asigna un nombre que es utilizado para saber cuál cliente está enviando datos y para elegir a cuál cliente enviar datos. A nivel de código este parámetro es llamado username (nombre de usuario).

En esta clase se definen varios métodos para gestionar la comunicación:

- **receive connections:** Este método acepta y registra los clientes. Se ejecuta en un hilo o proceso que monitorea constantemente si algún cliente solicita conectarse al servidor. Cuando un cliente solicita conexión, el servidor acepta la solicitud y envía un mensaje solicitando el username del cliente. Al recibir este dato, se realiza el registro del cliente en el sistema.
- **remove client:** Este método elimina clientes. Recibe el username del cliente a eliminar, verifica que exista en la lista de clientes y, en caso afirmativo, cierra el socket de comunicación asociado y elimina al cliente.
- **send to client:** Este método envía mensajes a los clientes. Recibe un mensaje y el username del destinatario. Verifica que el cliente exista y, si es así, envía el mensaje al cliente especificado.
- **handle client:** Este método captura todos los mensajes recibidos de los clientes. Según el contenido de cada mensaje, realiza la operación correspondiente para gestionar la estación.
- **client exists:** Este método verifica si el cliente existe. Recibe el username del cliente a verificar y revisa la lista de clientes para comprobar si existe.

Cliente

La clase Client, se encarga de gestionar la comunicación desde las Rasperrys. Recibe tres parámetros para crear su instancia, el host, port (puerto) y name station (nombre de la estación). El nombre de la estación le permite al servidor identificar la Raspberry con la que está comunicándose. Dispone de varios métodos para su gestión:

- **connect:** Crea el socket de comunicación y establece conexión con el servidor.
- **reconnect:** Se encarga de reestablecer la conexión de forma automática en caso de que el servidor tenga problemas.
- **receive messages:** Permite la recepción de mensajes desde el servidor.
- **write messages:** Permite el envío de mensajes hacia el servidor.
- **decode message:** Recibe un mensaje y lo decodifica.
- **run:** Similar rol que el descrito para la clase StationRamp. En este caso se encarga de crear e inicializar dos hilos. Uno para ejecutar el método receive messages y otro para el método write messages.
- **stop:** Cierra el socket y finaliza la comunicación con el servidor.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Estación de Trabajo Experimental se encuentra en fase de desarrollo; actualmente, se ha implementado el sistema de control de las bandas transportadoras y un puesto de trabajo está completamente instrumentalizado. Por esta razón, las pruebas de validación se realizaron únicamente con estos elementos.

Se logró establecer exitosamente la comunicación entre el módulo ESP8266, una Raspberry Pi y el controlador central, utilizando el protocolo TCP/IP sobre una red Wi-Fi. Las pruebas prácticas confirmaron que el sistema responde adecuadamente a los comandos enviados, ejecuta las acciones asignadas y mantiene una conexión estable durante el funcionamiento continuo.

La Figura 4 muestra una captura del sistema durante su operación. Adicionalmente, se incluye un video demostrativo accesible desde la descripción de la figura, en el cual se documenta el proceso de configuración y puesta en marcha de la estación.

En el video se ilustra la secuencia de inicialización desde el programa principal, que envía los parámetros necesarios a la Raspberry Pi para que esta gestione su respectivo puesto de trabajo. Una vez configurada, la Raspberry Pi entra en operación, controlando los sensores y actuadores de cada rampa conforme a las instrucciones recibidas. También se observa el funcionamiento de las bandas transportadoras, las cuales se activan y detienen en función de las órdenes emitidas desde el programa principal.

La comunicación entre los dispositivos fue exitosa; sin embargo, aún existen múltiples escenarios que deberán evaluarse una vez que la Estación de Trabajo Experimental esté completamente instrumentada en sus ocho puestos de trabajo.

Se realizaron pruebas en las que se simulaban fallos en la red Wi-Fi, y se comprobó que, una vez restablecida la conexión, todos los elementos del sistema se reconectaban automáticamente y continuaban su funcionamiento sin intervención manual.

No se realizaron mediciones formales de latencia en el envío de datos, ya que no se consideró relevante para esta etapa. La respuesta observada tanto en la Raspberry Pi como en el Arduino, fue

suficientemente rápida para los fines prácticos del sistema, y no se evidenciaron pérdidas de información en la transmisión de datos durante las pruebas realizadas.

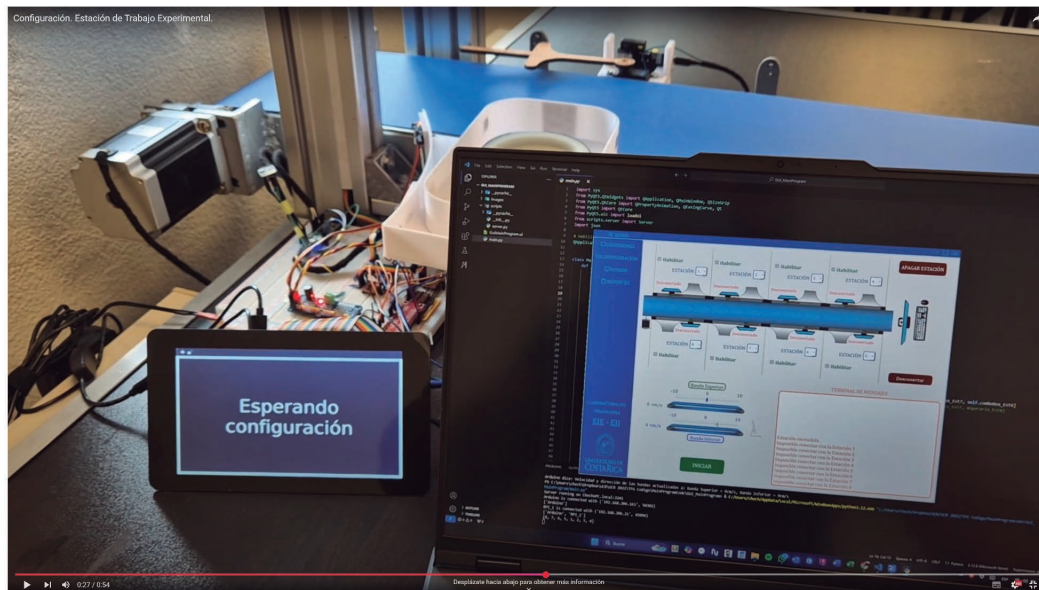


Fig. 4. Captura del video demostrativo del funcionamiento del sistema de comunicación (Ver video completo).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el diseño e implementación de un sistema de comunicación para los elementos de control de una Estación de Trabajo Experimental. Se logró establecer la comunicación entre un computador (funcionando como controlador central), una Raspberry Pi (encargada de gestionar el puesto de trabajo) y un Arduino (responsable del control de las bandas transportadoras), utilizando el protocolo TCP/IP sobre una red Wi-Fi.

Se realizó una descripción detallada de la estación, incluyendo los sensores, actuadores e interfaces gráficas desarrolladas, mediante las cuales los operarios pueden interactuar con el sistema. Asimismo, se explicó el proceso de configuración del servidor, alojado en el programa principal, y de los códigos cliente implementados en las Raspberry Pi y en el Arduino, detallando los diferentes métodos programados que permiten la interacción entre los dispositivos.

Finalmente, se presentaron los resultados obtenidos, destacando un video demostrativo que evidencia el funcionamiento del sistema de comunicación implementado.

Se plantea la necesidad de evaluar, en el futuro, nuevos escenarios de funcionamiento con la estación completamente implementada, con el fin de robustecer el sistema de comunicación mediante la incorporación de características adicionales que aseguren una operación eficiente y confiable. No obstante, para los fines de esta etapa, el sistema desarrollado ha demostrado ser funcional y exitoso.

REFERENCIAS

- [1] V. A. S. Herrera, H. P. de Araújo, C. G. Penteado, M. Gazziro y J. P. Carmo, «Low-Cost Embedded System Applications for Smart Cities», > *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 9, n.o 2, pág. 19, 2025.
- [2] N. O. Alonso et al., *Redes de comunicaciones industriales*. Editorial UNED, 2013.
- [3] A. E. Corona et al., «Protocolos tcp/ip de internet», > *Revista Digital Universitaria*, 2004.
- [4] J. A. Langbridge, *Arduino sketches: Tools and techniques for programming wizardry*. John Wiley & Sons, 2015.
- [5] J. R. Osio, L. Antonini, W. Aróztegui y J. A. Rapallini, «Descripción General de un Microcontrolador (Módulos de Comunicación)», > *Universidad Nacional de la Plata*, 2011.

De la Microestructura a la Mecánica: Algoritmos de Aprendizaje Profundo Predictivos y Generativos para el Modelado de Polisilicio

From Microstructure to Mechanics: Predictive and Generative Deep Learning Algorithms for Polysilicon Modeling

José Pablo Quesada-Molina

Professor and Researcher, Dept. of Mechanical Engineering, UCR

email: jose.quesadamolina@ucr.ac.cr

ORCID iD: 0000-0002-3358-284X

Stefano Mariani

Professor and Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering

Politecnico di Milano

email: stefano.mariani@polimi.it

ORCID iD: 0000-0001-5111-9800

Palabras clave:

Microestructuras digitales, polisilicio, propiedades elásticas efectivas, redes generativas adversarias, redes neuronales convolucionales, simulación de Monte Carlo, teselaciones de Voronoi.

Keywords:

Convolutional neural networks, digital microstructures, effective elastic properties, generative adversarial networks, Monte Carlo simulation, polysilicon, Voronoi tessellations

RESUMEN

Este trabajo presenta un marco basado en aprendizaje profundo para la generación de microestructuras sintéticas y el modelado de propiedades elásticas en películas delgadas de polisilicio epitaxial, relevantes para aplicaciones de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS). Para reducir la dimensionalidad y el costo computacional de las simulaciones, se analiza una sección delgada de la película bajo suposiciones de esfuerzo plano, preservando las características microestructurales esenciales. A partir de microestructuras digitalmente generadas, se entrena una Red Generativa Antagónica Convolucional Profunda (DCGAN) para la sinterización morfológica de grano realistas, y una Red Neuronal Convolucional (CNN) para la predicción del módulo elástico efectivo de las mismas. Este enfoque permite un modelado escalable y basado en datos para el diseño de materiales heterogéneos asistido por inteligencia artificial.

ABSTRACT

This work presents a deep learning framework for generating synthetic microstructures and modeling the elastic properties of epitaxial polysilicon films, relevant to Micro-electromechanical Systems (MEMS) applications. To reduce dimensionality and the cost of the computational simulations, a thin slice of the film is modeled under plane stress assumptions while preserving essential microstructural features. A Deep

Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) is trained on digitally-generated microstructures to synthesize realistic grain morphologies, and a Convolutional Neural Network (CNN) is used to predict their effective elastic moduli. This approach supports scalable, data-driven modeling of heterogeneous materials for AI-assisted design.

I. INTRODUCCIÓN

The advent of the fourth paradigm of science, centered on data-driven discovery, has transformed the way materials are analyzed and designed. Building upon the first three paradigms—experimental (empirical), theoretical (model-based), and computational—this new approach has led to the emergence of *Materials Informatics* [1]-[6], an interdisciplinary field that applies data science, artificial intelligence (AI), and informatics to accelerate the discovery, characterization, and optimization of material systems. By leveraging large-scale data and machine learning techniques, this paradigm enables the development of digital materials and the computational analysis of complex systems, such as polycrystalline materials, which exhibit intricate grain morphologies and anisotropic behavior. Among these, polysilicon, a key material in microelectronics noted for its dual role as a semiconductor and structural material [7], [8], is the focus of this study.

This work integrates data-driven approaches, leveraging deep learning (DL) techniques within the materials design process. A Deep Convolutional Generative Adversarial Network (DCGAN) [9] is trained on microstructural images generated using Voronoi tessellations [10], commonly employed in the simulation of polycrystalline structures [11]-[14], in combination with Monte Carlo (MC) simulations, which introduce stochastic variability by sampling grain orientation and distribution. The synthetic microstructures are exploited in the methodology proposed in [15] and later adapted in [16], for training image-based DL algorithms targeting data-driven homogenization.

These microstructures are used to study the effective mechanical properties through Statistical Volume Elements (SVEs), small subdomains of the polycrystalline aggregates that, while not representative individually, collectively capture the statistical behavior of the material [17]. This contrasts with the concept of a Representative Volume Element (RVE), a domain sufficiently large to reflect the material overall behavior and yield effective properties independent of boundary conditions, according to macroscopic uniformity [18]. In addition to the DCGAN used for microstructure generation, a Convolutional Neural Network (CNN) [19], [20], is trained to predict the effective elastic moduli of the original SVEs generated via MC simulations. The same model is later used to evaluate the moduli of DCGAN-generated morphologies, enabling automated, multiscale analysis of material behavior.

The remainder of this paper is organized as follows: Section II details the dataset generation process, based on simulations of transverse sections of polysilicon thin films. Finite element (FE) simulations and computational homogenization are used to compute the ground-truth elastic properties, which serve as training targets for the CNN. The model predicts directional Young's moduli from microstructure images, accounting for the anisotropic behavior at the microscale. The generative performance of the DCGAN is validated by comparing the elastic properties of synthetic SVEs, predicted using the CNN, with those obtained from FE simulations on original

data. This framework demonstrates the dual utility of DL for both predictive and generative modeling, with applications in AI-assisted materials design. Section III presents and analyzes the results, emphasizing the complementary roles of CNNs and GANs in characterizing and generating complex microstructures. Finally, Section IV summarizes the key findings and outlines directions for future work.

II. METHODS

A. Dataset Generation: Digital Representation of Epitaxially Grown Polysilicon Thin Films

This study models the microstructure of epitaxially grown polysilicon films used in MEMS devices, fabricated using the ThELMA process by *STMicroelectronics* [21], [22]. These films exhibit a columnar grain structure with crystallographic orientation aligned along the growth -axis. Assuming constant morphology through the film thickness and analyzing a thin slice of the material, the mechanical behavior is approximated using a 2D plane stress formulation.

Microstructures are generated using a MC-based method for regularized Voronoi tessellations (MC/Voronoi), following [15]. These reflect realistic grain boundary networks and in-plane crystallographic orientations, with grains modeled as convex polygons formed around quasi-random seed points. The grain size and orientation are treated as stochastic variables, both uniformly distributed. Grain orientation, defined by the angle between each grain's axis and the global -axis, varies in-plane, inducing an anisotropic behavior.

Datasets are built by varying the SVE size L , while keeping average grain size fixed, resulting in three datasets characterized by non-dimensional length-scale ratios λ . The parameter λ reflects the number of grains per SVE and influences statistical variability. As λ increases, properties converge toward the RVE behavior [15].

SVEs are represented as grayscale images (Fig.1A), where pixel intensity encodes the grain orientation θ , capturing the anisotropic stiffness of monocrystalline silicon. Orientation angles are remapped to the $[0, \pi]$ range to reflect the material elastic periodicity. FE simulations are performed to compute the effective Young's modulus in the x -direction, E_x , for each SVE. Although SVEs are not RVEs, analyzing hundreds or thousands of them captures the statistical distribution of apparent elastic properties [23]. Fig.1B shows the resulting histograms of E_x , where variability narrows as λ increases, consistent with convergence toward the RVE limit. These moduli serve as the target output for training the deep learning models. A total of approximately 4,000 SVEs are generated per dataset, enabling robust statistical analysis of grain-scale variability.

B. Generation of Ground Truth Data via Computational Homogenization

Effective elastic properties were computed using FE simulations under uniform displacement boundary conditions (UDBCs), applying classical homogenization over the SVE domain Ω . This

decoupled approach avoids multiscale coupling schemes like FE^2 [24], by directly applying prescribed deformations to each SVE. SVEs were meshed with 6-node triangular plane stress elements, resulting in approximately 1k, 6k, and 23k elements for Datasets 1–3. Mesh resolution was consistent across datasets. To compute the homogenized stiffness tensor, three loading cases were simulated: uniaxial strain in x , uniaxial strain in y , and pure shear (Fig.1C). In each case, displacements were applied to produce average strain fields $\bar{\epsilon}_{ij}$, and volume-averaged stresses $\bar{\sigma}_{ij}$ were calculated using $\bar{\sigma}_{ij} = E_{ij} \bar{\epsilon}_{ij}$. The full 2D stiffness tensor was then inverted to obtain the compliance tensor $\bar{\epsilon}_{ij}$, from which the elastic moduli were extracted (e.g., E_x).

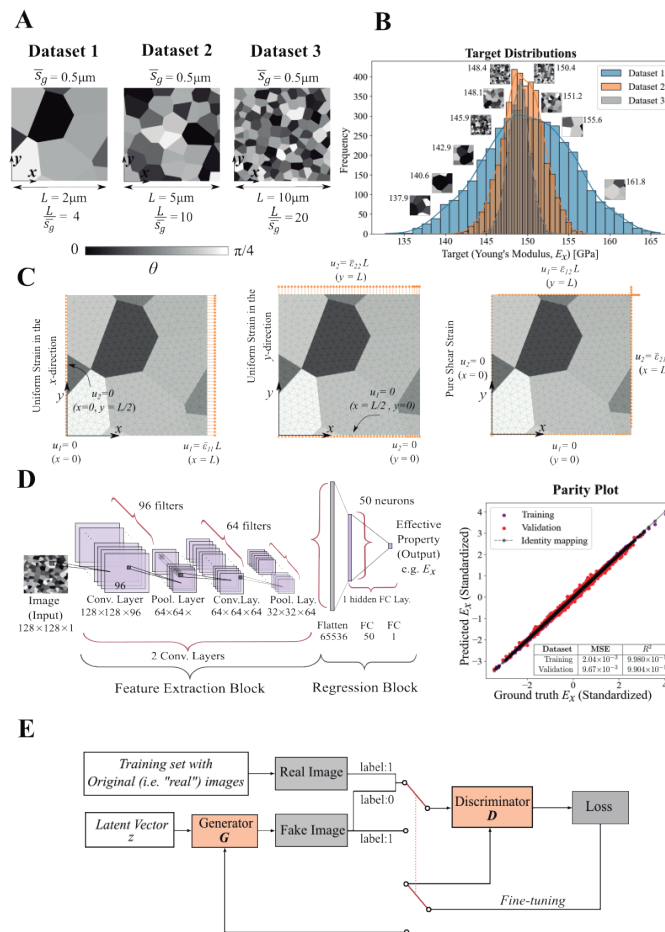


Fig 1. Overview of Dataset Generation, Modeling, and Deep Learning Framework. (A) Sample SVEs from each dataset, with pixel intensity encoding the in-plane crystallographic orientation. (B) Histograms of effective Young's modulus (i.e., E_y) showing reduced variability with increasing $L/\bar{\sigma}_g$. (C) Schematic of the prescribed displacement boundary conditions used in FE homogenization. (D, left) Best-performing CNN architecture obtained via hyperparameter tuning. (D, right) Parity plot comparing predicted and FE-computed (standardized) moduli for training and validation sets. (E) DCGAN framework: the generator G maps latent vectors to synthetic SVEs (i.e. fake images), while the discriminator D distinguishes real from synthetic SVEs images in adversarial training. When D is trained, both real and fake images are fed to it, and only its weights are updated. When G is trained, only fake images are generated and passed through D with frozen weights, using inverted labels to guide the generator's update.

C. Deep Learning Model Selection and Architecture Optimization

This work employs two deep learning architectures: a CNN to predict the effective elastic properties from microstructural images, and a DCGAN to generate high-fidelity synthetic microstructures.

For the predictive task, the CNN is trained on SVE images paired with elastic moduli computed via FE homogenization. A hyperparameter tuning campaign is conducted using a random search strategy, exploring a discrete space of model configurations with validation loss as the optimization criterion. The campaign, performed on Dataset 3 (chosen for its structural complexity) evaluated approximately 400 configurations. Early stopping (50-epoch patience) ensured convergence without overfitting. The best-performing architecture (Fig.1D, left), with its predictive performance illustrated by a parity plot (Fig.1D, right), shows strong agreement between predicted and true moduli, achieving a validation Mean Squared Error (MSE) of 1.5×10^{-4} and a coefficient of determination, $R^2 = 0.98$.

This architecture was then retrained on the full dataset (Datasets 1–3) without target standardization to capture cross-scale variability. To systematically assess the impact of input image resolution on model performance, datasets were rescaled to three resolutions, each doubling the previous: 256×256 , 512×512 , and 1024×1024 pixels. As input resolution increases, the model's size scales accordingly, with the number of trainable parameters rising from approximately 0.9 million at the lowest resolution to 3.3 million and 13.2 million at the intermediate and highest resolutions, respectively. For each resolution, the full dataset was split into an training/validation set.

For the generative modeling, a DCGAN is trained to replicate the spatial and statistical features of the Voronoi-based SVEs. The architecture includes a generator, G , that transforms latent noise vectors into synthetic microstructures, and a discriminator, D , that classifies images as real (i.e. MC/Voronoi-based) or synthetic (i.e. G -based) (Fig.1E). Both networks follow standard DCGAN design heuristics [9].

III. RESULTS

This section presents the results for the two DL tasks: predicting the elastic properties from digital SVEs of polysilicon microstructures, and generating high-fidelity synthetic SVEs. The CNN is first evaluated across input resolutions for accuracy and robustness. Then, the DCGAN is assessed for its ability to replicate the statistical and structural features of the *real* (MC/Voronoi-based) SVEs, with validation performed using the trained CNN.

A. CNN Predictive Performance

The CNN was evaluated across the three previously defined input resolutions, with increased resolution significantly raising the number of trainable parameters. This is primarily due to the expansion of the dense regression layers, where flattened feature maps become larger. Nevertheless, predictive accuracy remained consistent across all configurations, as shown in the parity plots in Fig.2A. The best-performing model was the one trained using the lowest input image resolution, achieving a MSE of 1.5×10^{-4} on the validation set, corresponding to a Root Mean Squared Error (RMSE) of 0.012 .

. This RMSE corresponds to a relative error of less than 0.5% when compared to the mean elastic modulus (E). Additionally, the model attained an R^2 value of 0.98, indicating strong predictive performance.

Moreover, only a small number of samples (less than 5% of the dataset) showed noticeable deviations from the parity diagonal. These outliers were consistently present across all resolutions and typically corresponded to overestimations of E . Their persistence suggests that they are due to inherent dataset complexity, not resolution sensitivity.

Interestingly, increasing resolution did not significantly improve predictive performance. This may be attributed to the use of fixed convolution kernels across resolutions. At lower resolutions, these filters better align with the scale of microstructural features, while at higher resolutions, the same filters may become too localized to capture broader spatial patterns. Furthermore, because the grain size was relatively large compared to the pixel size, higher resolution added detail without necessarily improving learning efficiency or accuracy.

B. DCGAN Generative Performance

The trained DCGAN successfully generated diverse, high-fidelity synthetic SVEs that reflected the morphological characteristics of the original datasets. Examples of the generated data and corresponding histograms of E values are shown in Fig.2B. Key architectural and training choices—such as using larger convolutional kernels, LeakyReLU activations in G , and higher-dimensional latent vectors—contributed to improved image quality and better representation of microstructural variability.

Across Datasets 1, 2, and 3, the synthetic samples closely replicated the mean and standard deviation of the original E distributions. However, minor discrepancies were observed in higher-order moments: some datasets exhibited slight shifts in skewness or kurtosis, indicating minor differences in asymmetry and tail behavior. For instance, the synthetic distribution for Dataset 1 showed a slight rightward shift in its primary mode. Despite these subtle variations, the synthetic samples maintained strong statistical fidelity. Notably, the generator avoided mode collapse and produced samples with novel features, such as curved grain boundaries and merged grain “islands,” which were not observed in the original data, suggesting structural diversity beyond simple replication.

The trained CNN was used to evaluate the elastic properties of the synthetic images. The resulting predicted E distributions closely matched those of the original datasets, further validating the physical realism of the generated SVEs. The DCGAN offers significant advantages in throughput and autonomy: once trained (90 minutes), it can rapidly produce large volumes of realistic microstructures without requiring expert-defined descriptors. While further improvements could be made with larger training sets or extended tuning, this work focuses on demonstrating feasibility and robustness with a compact, data-driven framework.

CONCLUSIONS

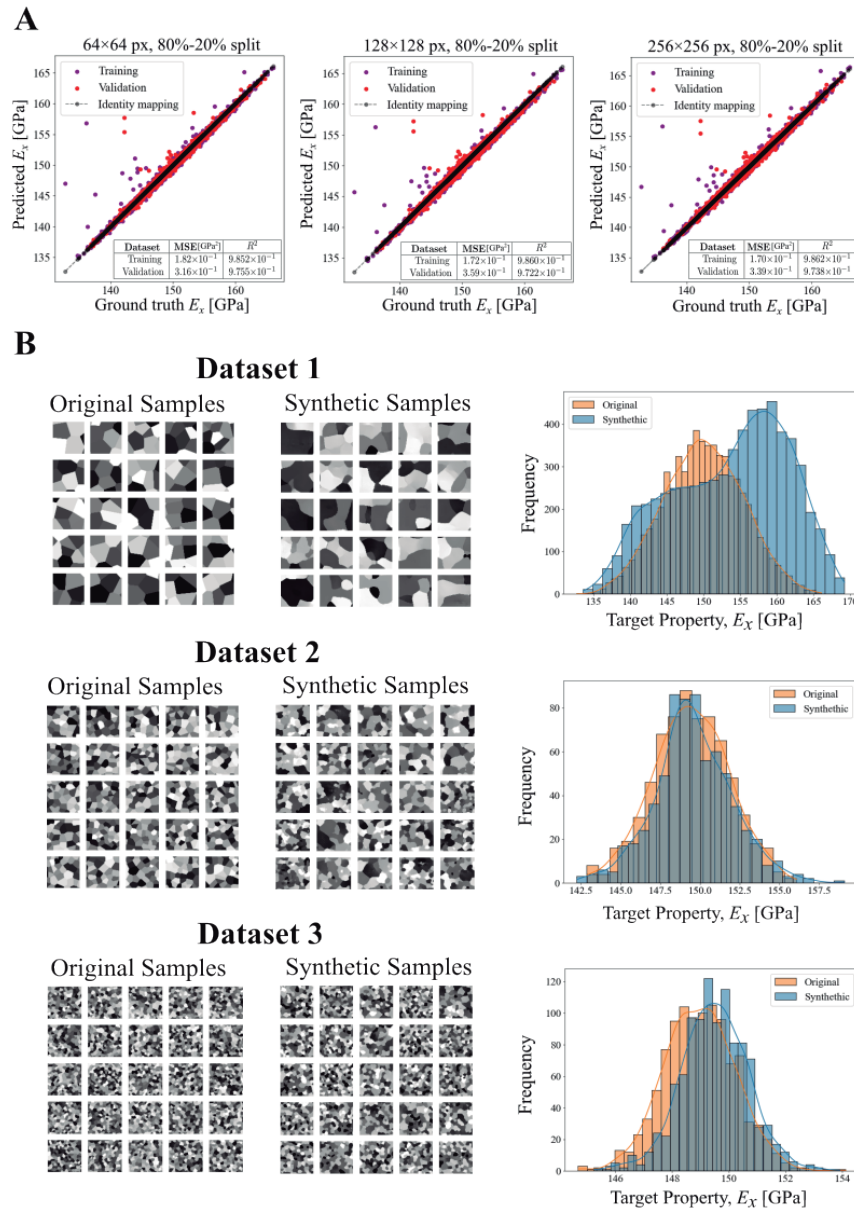


Fig 2. Performance of Predictive and Generative Models. (A) Parity plots showing CNN predictions of versus ground truth across different input resolutions. Despite substantial differences in model size, predictions remain consistent, with minor overestimations in a small subset of outliers. (B, left) Grids of original (MC/Voronoi-based) and synthetic (G -based) samples. (B, right) Histograms of CNN-predicted values for synthetic SVEs generated by the trained generator network G , compared against the histogram of values for an equally sized subset of original SVEs, to evaluate the statistical fidelity of the generated samples relative to the ground truth data. The distributions demonstrate strong agreement in statistical properties, confirming the fidelity of the generated microstructures.

This study demonstrated the application of deep learning models, specifically CNNs and DCGANs, for the prediction and generation of digital polysilicon microstructures. The CNN accurately predicted effective elastic moduli of SVEs at different resolutions, showing robustness and limited sensitivity to image granularity, provided that microstructural features are significantly larger than the pixel size. In parallel, the DCGAN generated synthetic microstructures that visually and statistically preserved key morphological and mechanical characteristics.

To better assess generalization, future work should evaluate the CNN on SVEs exhibiting inter- and intra-length scale variability, including unseen grain-scale features, topological differences, and microstructural patterns not represented in the training data. Applying the framework to full MEMS devices would enable evaluation not only at the material-property level, but also in terms of its impact on device-level functional performance.

Validation of the synthetic SVEs through finite element simulations is essential to confirm their mechanical equivalence to real samples. Additionally, exploring the DCGAN latent space could enable controlled microstructure manipulation and inverse design, leveraging latent space arithmetic and interpolation for morphing and controlled synthesis [9],[25],[26], laying the groundwork for future property-driven microstructure design.

REFERENCES

- [1] K. Rajan, “Materials informatics,” *Materials Today*, vol. 8, no. 10, pp. 38–45, 2005.
- [2] A. Agrawal and A. Choudhary, “Perspective: Materials informatics and big data: Realization of the “fourth paradigm” of science in materials science,” *Apl Materials*, vol. 4, no. 5, 2016.
- [3] R. Ramprasad, R. Batra, G. Pilania, A. Mannodi-Kanakkithodi, and C. Kim, “Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects,” *npj Computational Materials*, vol. 3, no. 1, p. 54, 2017.
- [4] J. M. Rickman, T. Lookman, and S. V. Kalinin, “Materials informatics: From the atomic-level to the continuum,” *Acta Materialia*, vol. 168, pp. 473–510, 2019.
- [5] A. Agrawal and A. Choudhary, “Deep materials informatics: Applications of deep learning in materials science,” *Mrs Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 779–792, 2019.
- [6] V. Gupta, W.-k. Liao, A. Choudhary, and A. Agrawal, “Evolution of artificial intelligence for application in contemporary materials science,” *MRS communications*, vol. 13, no. 5, pp. 754–763, 2023.
- [7] K. E. Petersen, “Silicon as a mechanical material,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420–457, 1982.
- [8] T. Ando and X.-A. Fu, “Materials: Silicon and beyond,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 296, pp. 340–351, 2019.
- [9] A. Radford, L. Metz, and S. Chintala, “Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks,” *arXiv preprint arXiv:1511.06434*, 2015.
- [10] G. Voronoi, “Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Premier mémoire. sur quelques propriétés des formes quadratiques positives parfaites.,” *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)*, vol. 1908, no. 133, pp. 97–102, 1908.
- [11] Z. Fan, Y. Wu, X. Zhao, and Y. Lu, “Simulation of polycrystalline structure with voronoi diagram in laguerre geometry based on random closed packing of spheres,” *Computational materials science*, vol. 29, no. 3, pp. 301–308, 2004.
- [12] T. Suzudo and H. Kaburaki, “An evolutionary approach to the numerical construction of polycrystalline structures using the voronoi tessellation,” *Physics Letters A*, vol. 373, no. 48, pp. 4484–4488, 2009.
- [13] S. Falco, J. Jiang, F. De Cola, and N. Petrinic, “Generation of 3d polycrystalline microstructures with a conditioned laguerre-voronoi tessellation technique,” *Computational Materials Science*, vol. 136, pp. 20–28, 2017.

- [14] X. Zheng, T. Sun, J. Zhou, R. Zhang, and P. Ming, "Modeling of polycrystalline material microstructure with 3d grain boundary based on laguerre–voronoi tessellation," *Materials*, vol. 15, no. 6, p. 1996, 2022.
- [15] S. Mariani, R. Martini, A. Ghisi, A. Corigliano, and M. Beghi, "Overall elastic properties of polysilicon films: A statistical investigation of the effects of polycrystal morphology," *International Journal for Multi-scale Computational Engineering*, vol. 9, no. 3, 2011.
- [16] J. P. Quesada-Molina, L. Rosafalco, and S. Mariani, "Mechanical characterization of polysilicon mems devices: A stochastic, deep learning-based approach," in *2020 21st International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, IEEE, 2020, pp. 1–8.
- [17] M. Ostoja-Starzewski, "Material spatial randomness: From statistical to representative volume element," *Probabilistic engineering mechanics*, vol. 21, no. 2, pp. 112–132, 2006.
- [18] R. Hill, "Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 11, no. 5, pp. 357–372, 1963.
- [19] Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner, "Gradient-based learning applied to document recognition," *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324, 1998.
- [20] Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, et al., "Backpropagation applied to handwritten zip code recognition," *Neural computation*, vol. 1, no. 4, pp. 541–551, 1989.
- [21] G. Allegato, L. Corso, and C. Valzasina, "Mems inertial sensors using the thelma process," *STMicroelectronics Technical Reports*, 2018, Accessed on: October 5, 2024.
- [22] A. Corigliano, B. De Masi, A. Frangi, C. Comi, A. Villa, and M. Marchi, "Mechanical characterization of polysilicon through on-chip tensile tests," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 200–219, 2004.
- [23] R. Bostanabad, Y. Zhang, X. Li, et al., "Computational microstructure characterization and reconstruction: Review of the state-of-the-art techniques," *Progress in Materials Science*, vol. 95, pp. 1–41, 2018.
- [24] F. Feyel, "A multilevel finite element method (F E2) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua," *Computer Methods in applied Mechanics and engineering*, vol. 192, no. 28-30, pp. 3233–3244, 2003.
- [25] T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, and J. Dean, "Efficient estimation of word representations in vector space," *arXiv preprint arXiv:1301.3781*, 2013.
- [26] T. Karras, S. Laine, and T. Aila, "A style-based generator architecture for generative adversarial networks," in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2019, pp. 4401–4410.

Validating Object Detection with Synthetic Data: Promising Practice or False Hope?

Validación de la detección de objetos con datos sintéticos: ¿Práctica prometedora o falsa esperanza?

Jorge Badilla-Solórzano

Docente e Investigador, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR

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

0000-0003-4216-1016

Palabras clave:

Aumento por copia y pegado, detección de instrumentos quirúrgicos, eficiencia de anotación, inserción de Objetos Basada en Máscaras (MBOI), validación sintética.

Keywords:

Copy-paste augmentation, label efficiency, Mask-Based Object Insertion (MBOI), synthetic validation, surgical instrument detection.

RESUMEN

El uso de datos sintéticos para entrenar modelos de detección de objetos ha ganado relevancia debido a su potencial para reducir el costo y esfuerzo asociados con la anotación manual. En este estudio se investiga si los datos sintéticos generados mediante el método MBOI, que crea imágenes sintéticas combinando objetos individuales con fondos variados, pueden emplearse también de manera efectiva para la validación. Se entrenaron modelos YOLO11 utilizando datos sintéticos para el entrenamiento y se evaluó su desempeño utilizando conjuntos de validación reales y sintéticos. El rendimiento se midió con métricas estándar de detección: box mAP y mask mAP. Los resultados mostraron diferencias mínimas en el desempeño entre los distintos conjuntos de validación. Pruebas estadísticas confirmaron que estas diferencias no son significativas, lo que sugiere que la anotación manual de datos de validación podría no ser estrictamente necesaria. Estos hallazgos destacan el potencial de los datos sintéticos para reducir aún más los costos de anotación y apoyar el desarrollo de pipelines totalmente sintéticos para la detección de objetos. Se reconocen limitaciones en la diversidad y escala de los datos, y se recomienda validar estos resultados en contextos más amplios.

ABSTRACT

The use of synthetic data for training object detection models is increasingly popular due to its potential to reduce manual annotation costs. This study investigates whether synthetic data generated using the MBOI method—a technique that creates synthetic images by compositing annotated single-object images onto background scenes—can also be effectively used for validation. YOLO11 models were trained solely on synthetic data and evaluated using both real-world and synthetic validation sets. Performance was measured using box mAP and mask mAP metrics. Results showed minimal differences in performance between validation

sets, with statistical tests confirming no significant variations. These findings suggest that manually annotated validation data may be unnecessary, supporting the development of fully synthetic pipelines that can greatly reduce annotation effort. Although limited by dataset scale and diversity, this work lays the groundwork for future studies to validate the approach in broader contexts.

I. INTRODUCCIÓN

The rapid advancement of deep learning has revolutionized object detection and instance segmentation, enabling transformative applications across diverse domains such as facial recognition [1], robotics [2], autonomous driving [3], and robot manipulation [4]. State-of-the-art architectures, ranging from transformer-based detectors like DETR [5], to hybrid models such as Mask2Former [6], and efficient YOLO variants [7], achieve outstanding accuracy. However, these models remain heavily reliant on large-scale, manually annotated datasets. Acquiring such data is costly, labor-intensive, and time-consuming, posing a significant bottleneck to the scalability of modern detection systems. This challenge is exemplified by the COCO dataset, a widely used benchmark for object detection and instance segmentation. This set includes 2.5 million annotated object instances across 328k images, requiring approximately 550k worker hours (22 hours per 1000 instances) for annotation [8].

To address this annotation bottleneck, the generation of synthetic data has emerged as a promising strategy for creating large, annotated datasets with minimal human effort. By leveraging simulation or image-level augmentation, these techniques facilitate the production of high-quality training data. Methods such as domain randomization [9] and copy-paste augmentation [10] have demonstrated potential to improve generalization and significantly enhance detection performance. Synthetic data approaches have predominantly focused on training data, with limited investigation into the effects of their use in the validation set.

Based on domain randomization and copy-paste augmentation, the Mask-Based Object Insertion (MBOI) method was proposed as a structured strategy for synthetic image generation with automatic instance-level annotations [11]. MBOI leverages curated collections of manually annotated, single-object images and representative background scenes. During data generation, foreground objects are randomly transformed and inserted onto backgrounds, yielding diverse and fully annotated synthetic training data. In prior work, MBOI was used for surgical instrument detection, surpassing 85 mean Average Precision (mAP) across 18 instrument classes [12]. Given its promising performance, MBOI is a compelling candidate for further investigation, which has not yet been evaluated as a source of validation data.

Surgical instrument detection is a high-impact application of object detection, critical for enabling autonomous surgical assistance systems to safely and accurately manipulate tools during procedures. However, while synthetic data has shown promise for training these detectors, real-world validation and testing still depend heavily on manually annotated datasets. This continued reliance on real-world data presents a significant bottleneck in the development of efficient detection systems. While real-world test datasets remain fundamental for reliably assessing model performance,

the use of fully synthetic validation sets could substantially reduce the annotation burden during the preparation of a detector, thereby improving development speed and scalability.

In this work, the MBOI method is leveraged to explore the viability of using fully synthetic data for validation in the context of surgical instrument detection. The study evaluates whether validation sets generated with MBOI can serve as a viable alternative to manually annotated real-world validation data. The main contribution is an empirical assessment of this viability, based on a comparison between models validated on synthetic data and those validated on real-world data.

II. RELATED WORK

Numerous studies have aimed to reduce reliance on manually annotated data for training object detectors [13]. Two prominent strategies have emerged: (1) the use of simulated environments that replicate specific physical scenes [14], and (2) the augmentation or transformation of real-world data through image-level techniques [15]. Within the latter category, copy-paste methods [16] have shown notable promise, inspiring the development of more structured approaches such as the MBOI method [11,12], which is the basis of this work.

Prior research has consistently shown that synthetic training data can improve generalization to real-world data. However, in nearly all cases, real-world validation datasets are still employed to guide model development and evaluate performance. This continued reliance on annotated real-world validation data presents a key limitation, especially in domains where obtaining annotations is costly or impractical.

Despite growing interest in synthetic data for training, the use of fully synthetic validation sets remains largely unexplored, making their effectiveness an open research question. In the specific domain of surgical instrument detection, several works have explored the use of synthetic data for training [11,12,17,18]. These include both simulated 3D environments and 2D data augmentation approaches, which have achieved strong performance in various benchmarks. However, to the best of our knowledge, no prior work has explicitly assessed the feasibility of using synthetic validation datasets in this context.

In this work, we evaluate the effectiveness of using fully synthetic data for both training and validation, aiming to assess whether this approach can serve as a viable alternative to real-world annotations, using MBOI data.

III. METHODS

A. Synthetic Data Generation with MBOI

To investigate the viability of using fully synthetic training and validation data, we employ the Mask-Based Object Insertion (MBOI) method. MBOI relies on *source data*, which consists of collections of single-object images with corresponding point clouds and manual annotations

(segmentation masks), along with background images representing the target scenes without the objects of interest. Each object class has a dedicated set of annotated single-object images in the source data, enabling the generation of large amounts of synthetic data with minimal manual effort and high label efficiency. Fig. 1 illustrates the method as a black box that takes source data as input and outputs synthetic data.

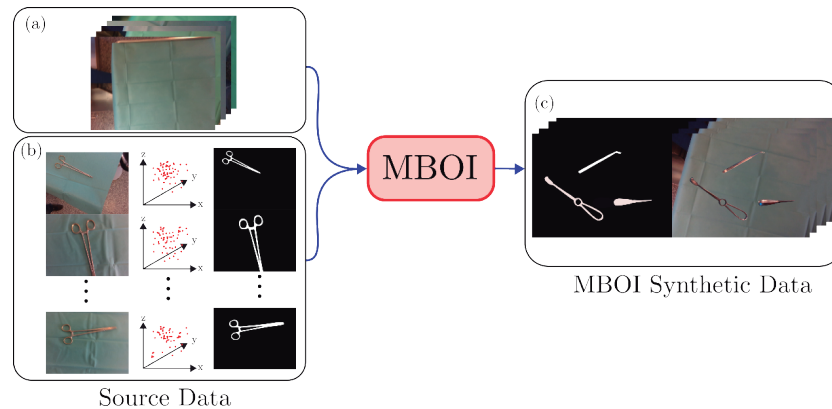


Fig. 1. Diagram illustrating the MBOI method. The method relies on source data, which includes: (a) collections of background images, and (b) single-object images along with their corresponding segmentation masks and point clouds. These inputs are used to generate (c) high-quality, automatically annotated synthetic data.

B. Experimental Setup

For the proposed evaluation, we relied on a surgical instrument set for wisdom teeth extraction, consisting of 18 different surgical tools. The source data was collected in the Medical Lab of the Institute of Mechatronic Systems at Leibniz Universität Hannover using an Intel RealSense D435 camera. Single-object images were manually annotated using the online tool Hasty [19]. The complete source data includes 75 annotated single-object images per instrument (1350 in total) and 250 background images.

To support the experiments, a separate real-world dataset of 169 multi-instrument images (totaling 1,080 instrument instances) was annotated in collaboration with the Brazilian company FexData [20]. This dataset was split into two subsets: a validation set of 82 images and a test set of 87 images. This real-world validation set was used to train baseline models for evaluating the effectiveness of synthetic training and validation data, while the test set provided a consistent benchmark for evaluating all trained models.

C. Experimental Procedure

To assess the viability of using synthetic data for both training and validation, the source data was partitioned for each experimental run as follows: 60 single-object images and 200 background images were used to generate the synthetic training set via MBOI, while the remaining 15 single-object images and 50 background images were reserved for validation.

The synthetic training dataset included 4000 instances per instrument. Regarding validation, three different sets were employed to analyze their impact on model performance:

1. **Real Validation Set (Baseline):** 82 annotated real multi-instrument images, comprising approximately 60 instances per instrument.
2. **Synthetic Validation Set A:** Generated with MBOI using the same source data as the training set (60 single-object and 200 background images), including 500 instances per instrument.
3. **Synthetic Validation Set B:** Generated with MBOI using the non-overlapping source data reserved for validation (15 single-object and 50 background images), including 500 instances per instrument.

For each validation set, a separate YOLOv11-nano model was trained on the same synthetic training data, differing only in the validation data used during training. Training was performed on a workstation equipped with an NVIDIA GeForce RTX 3070 GPU for 40 epochs, using a batch size of 36 and a constant learning rate of 0.01.

To ensure robustness and minimize the influence of specific data splits, the entire experiment was repeated five times, each with randomized, non-overlapping partitions of the source data. In each run, a different subset of 15 single-object images and 50 background images was set aside for validation, ensuring that Synthetic Validation Set B always relied on source data unseen during training. Thus, a total of 15 instrument detection models (three per run) were trained.

IV. RESULTS

The results are summarized in Table 1. For ease of interpretation, the same data are also depicted as box plots in Fig. 2 Regarding box mAP, only minimal differences were observed among the validation sets. In contrast, for mask mAP, the models validated with real data performed moderately better, with an average advantage of 0.016 mAP compared to those validated on synthetic data. Qualitatively, these differences suggest that the variations in data distribution may not be statistically significant. To rigorously assess this, we conducted Kruskal–Wallis statistical tests, which are appropriate for the limited sample size. The results are presented in Table I.

Since both p-values exceed 0.05, we fail to reject the null hypothesis, indicating no statistically significant difference in mAP distributions across the three validation sets (Real, Synthetic A, and Synthetic B) for both box and mask mAP. From these findings, two important observations arise:

1. Comparing the results obtained using real-world validation data versus synthetic MBOI data reveals no significant disadvantage in performance. This suggests that annotating validation data may be considered optional, potentially reducing the annotation effort.
2. The highly similar results obtained with both the same source data used for training (Synthetic A) and separate, unseen source data (Synthetic B) demonstrate that annotating additional data to generate the synthetic validation sets is unnecessary.

TABLE I
PERFORMANCE COMPARISON (mAP) OF YOLO11 MODELS TRAINED WITH SYNTHETIC DATA, VALIDATED USING DISTINCT DATASETS: REAL, SYNTHETIC A, SYNTHETIC B

Box mAP						
	1	2	3	4	5	Mean + Std
Real	0.886	0.897	0.897	0.895	0.897	0.894 ± 0.005
Synthetic A	0.886	0.891	0.890	0.899	0.900	0.893 ± 0.006
Synthetic B	0.881	0.891	0.886	0.899	0.897	0.891 ± 0.007

Mask mAP						
	1	2	3	4	5	Mean + Std
Real	0.802	0.830	0.812	0.833	0.812	0.818 ± 0.013
Synthetic A	0.778	0.802	0.803	0.815	0.812	0.802 ± 0.015
Synthetic B	0.791	0.797	0.800	0.818	0.803	0.802 ± 0.010

TABLE II
SUMMARY OF KRUSKAL-WALLIS TEST RESULTS COMAPRING
mAP DISTRIBUTIONS ACROSS VALIDATION SETS

Metric	H-statistic	p-value	Interpretation
Box mAP	0.468	0.791	No significant difference
Mask mAP	3.401	0.183	No significant difference

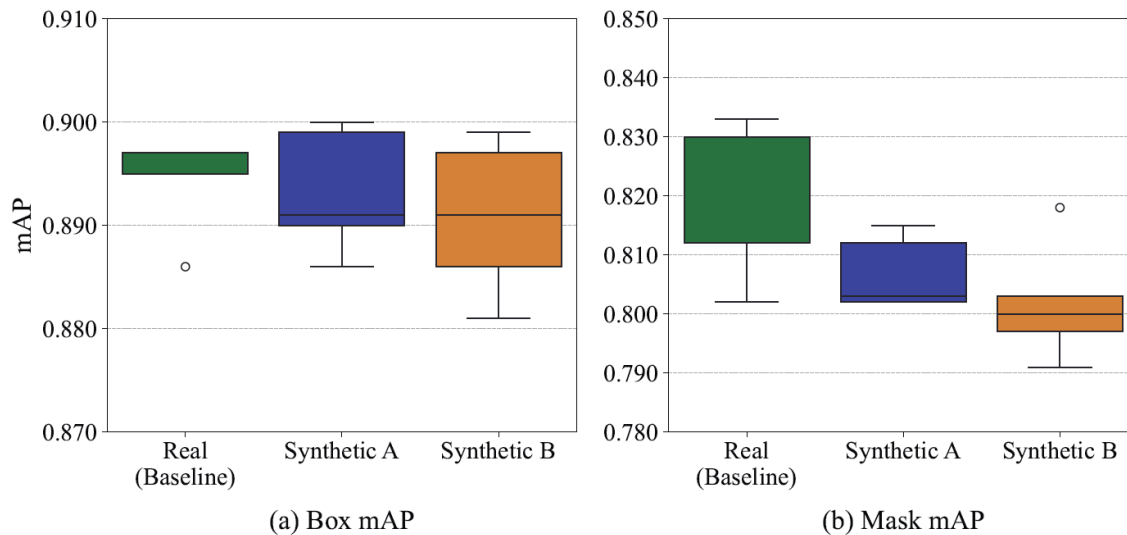


Fig. 2. Results of YOLO11 models trained on synthetic data and validated on different validation sets (Real, Synthetic A, Synthetic B). The box mAP results (a) indicate no statistically significant differences between the distributions. In contrast, the mask mAP results (b) reveal a small difference, motivating a statistical test. All synthetic datasets were generated with MBOI, and all results correspond to evaluations on the real-world test set.

Together, these results confirm that synthetic MBOI data can effectively replace manually annotated real-world validation sets without compromising detection performance, at least within the scope of the current study. However, several limitations must be acknowledged. First, the findings

are based solely on synthetic data generated using the MBOI method and thus may not generalize to other synthetic data generation techniques. Second, the evaluation was limited to a single set of instruments and a single environment, which may constrain the diversity of the results. Third, although promising performance was observed, the training data included only 60 annotated instances, falling short of the 75-instance recommendation suggested in prior work. A more extensive study, incorporating multiple environments, varied instruments, and a larger set of annotated examples, will be required to fully validate these conclusions. Nevertheless, the results presented here highlight the strong potential of synthetic validation data and provide a solid foundation for future research into more label-efficient training and evaluation strategies for object detection.

CONCLUSIONS

This study focused on evaluating the effectiveness of using synthetic data generated via the MBOI method for validation in object detection, building on prior work that established its use for training. Through controlled experiments involving YOLO11 models and multiple validation sets (Real, Synthetic A, and Synthetic B), performance was assessed using both box and mask mAP metrics. Statistical analysis, including Kruskal–Wallis tests, revealed no significant differences across validation sets, indicating that synthetic validation data can be a viable alternative to real-world annotations.

These findings underscore the label efficiency of the MBOI method and highlight its potential to substantially reduce the manual annotation burden commonly associated with object detection and instance segmentation tasks. Notably, validation data derived from the same annotated source as the training set (Synthetic A) did not compromise performance compared to validation data generated from previously unseen sources (Synthetic B). This suggests that once an annotated source dataset is available, the MBOI method can be applied extensively without additional manual labeling.

While this study was limited to a single environment, a specific instrument set, and a relatively small amount of annotated data (75 instances), the promising results provide a solid foundation that justifies further research to validate and extend the approach across more diverse settings and larger datasets.

In conclusion, this work provides compelling evidence that MBOI-generated synthetic data can be effectively used for both training and validation, demonstrating that the entire training process of an object detector can be driven solely by high-quality synthetic data. This approach holds great potential to become standard practice, significantly reducing manual annotation efforts not only in instrument detection but across object detection tasks.

ACKNOWLEDGEMENT

The author extends sincere gratitude to the Institute of Mechatronics Systems at Leibniz Universität Hannover for facilitating the collection of image data and granting access to their laboratory facilities. Further appreciation is expressed to FexData for their meticulous and professional

annotation of the real data employed for validation and testing, which was instrumental in ensuring the quality and reliability of the study's results.

REFERENCES

- [1] K. Teoh, R. Ismail, S. Naziri, R. Hussin, M. Isa, and M. Basir, "Face recognition and identification using deep learning approach," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, vol. 1755, 2021, p. 012 006. DOI: 10.1088/1742-6596/1755/1/012006.
- [2] H. A. Pierson and M. S. Gashler, "Deep learning in robotics: A review of recent research," *Advanced Robotics*, vol. 31, no. 16, pp. 821–835, 2017. DOI: 10.1080/01691864.2017.1365009.
- [3] S. Grigorescu, B. Trasnea, T. Cocias, and G. Macesanu, "A survey of deep learning techniques for autonomous driving," *Journal of field robotics*, vol. 37, no. 3, pp. 362–386, 2020. DOI: 10.1002/rob.21918.
- [4] B. Griffin, "Mobile robot manipulation using pure object detection," in *Proceedings of the IEEE/CVFWinter Conference on Applications of Computer Vision*, 2023, pp. 561–571. DOI: 10.1109/WACV56688.2023.00063.
- [5] N. Carion, F. Massa, G. Synnaeve, N. Usunier, A. Kirillov, and S. Zagoruyko, "End-to-end object detection with transformers," in *European conference on computer vision*, Springer, 2020, pp. 213–229. DOI: 10.1007/978-3-030-58452-8 13.
- [6] B. Cheng, I. Misra, A. G. Schwing, A. Kirillov, and R. Girdhar, "Masked-attention mask transformer for universal image segmentation," in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2022, pp. 1290–1299. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.00135.
- [7] A. Vijayakumar and S. Vairavasundaram, "Yolo-based object detection models: A review and its applications," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 83, no. 35, pp. 83 535–83 574, 2024. DOI: 10.1007/s11042-024-18872-y.
- [8] T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, et al., "Microsoft coco: Common objects in context," in *Computer vision–ECCV 2014: 13th European conference, Zurich, Switzerland, September 6–12, 2014, proceedings, part v 13*, Springer, 2014, pp. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1 48.
- [9] J. Tremblay, A. Prakash, D. Acuna, et al., "Training deep networks with synthetic data: Bridging the reality gap by domain randomization," in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition workshops*, 2018, pp. 969–977. DOI: 10.1109/CVPRW.2018.00143.
- [10] D. Dwibedi, I. Misra, and M. Hebert, "Cut, paste and learn: Surprisingly easy synthesis for instance detection," in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2017, pp. 1301–1310. DOI: 10.1109/ICCV.2017.146.
- [11] J. Badilla-Solórzano, S. Spindeldreier, S. Ihler, N.-C. Gellrich, and S. Spalthoff, "Deep-learning-based instrument detection for intra-operative robotic assistance," *International journal of computer assisted radiology and surgery*, vol. 17, no. 9, pp. 1685–1695, 2022. DOI: 10.1007/s11548-022-02715-y.
- [12] J. Badilla-Solórzano, N.-C. Gellrich, T. Seel, and S. Ihler, "Modular, label-efficient dataset generation for instrument detection for robotic scrub nurses," in *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, Springer, 2023, pp. 95–105. DOI: 10.1007/978-3-031-58171-7 10.
- [13] A. Westerski and W. T. Fong, "Synthetic data for object detection with neural networks: State-of-the-art survey of domain randomisation techniques," *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications*, vol. 21, no. 1, pp. 1–20, 2024. DOI: 10.1145/3637064.

- [14] C. M. De Melo, A. Torralba, L. Guibas, J. DiCarlo, R. Chellappa, and J. Hodgins, “Next-generation deep learning based on simulators and synthetic data,” *Trends in cognitive sciences*, vol. 26, no. 2, pp. 174–187, 2022. DOI: 10.1016/j.tics.2021.11.008.
- [15] B. Zoph, E. D. Cubuk, G. Ghiasi, T.-Y. Lin, J. Shlens, and Q. V. Le, “Learning data augmentation strategies for object detection,” in *Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part XXVII 16, Springer, 2020, pp. 566–583. DOI: 10.1145/3673232.
- [16] G. Ghiasi, Y. Cui, A. Srinivas, et al., “Simple copy-paste is a strong data augmentation method for instance segmentation,” in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2021, pp. 2918–2928. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00294.
- [17] A. Nakano and K. Nagamune, “A development of robotic scrub nurse system-detection for surgical instruments using faster region-based convolutional neural network–,” *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 26, no. 1, pp. 74–82, 2022. DOI: 10.20965/jaciii.2022.p0074.
- [18] L. Wiese, L. Hinz, E. Reithmeier, P. Korn, and M. Neuhaus, “Detection of surgical instruments based on synthetic training data,” *Computers*, vol. 14, no. 2, p. 69, 2025. DOI: 10.3390/computers14020069.
- [19] Hasty, A single platform for any vision ai use case, [Online; accessed October 10, 2024], 2024. [Online]. Available: <https://app.hasty.ai>.
- [20] FexData, Fexdata - data labeling technology, <https://fexdata.com>, Accessed: 2025-03-25, 2025.

Comparación entre Dos Métodos de Cálculo en un Potenciostato Basado en Arduino UNO

Comparison Between Two Calculation Methods in an Arduino UNO-based Potentiostat

Alejandro Delgado Castro

Investigador, Sede Regional de Guanacaste

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

Código ORCID: 0000-0002-5475-7813

Omar Rojas Bolaños

Investigador, Sede Regional de Guanacaste

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

Código ORCID: 0000-0001-8876-3181

Palabras clave:

Arduino, Electrodeposición, Potenciostato, Óxido de manganeso IV, Voltametría cíclica.

Keywords:

Arduino, Cyclic voltammetry, Electrodeposition, Potentiostat, Manganese (IV) oxide.

RESUMEN

En este trabajo, se lleva a cabo la comparación de dos métodos para el cálculo de los parámetros operativos de un potenciostato controlado por una tarjeta Arduino UNO: ancho de pulso de la señal PWM, voltaje de celda y corriente de celda. Se realiza una descripción del proceso de ajuste para obtener las curvas de calibración del potenciostato en estudio. Además, con el fin de evaluar la precisión de los voltajes de celda y las corrientes de celda arrojados por cada metodología de cálculo, se comparan los voltamogramas cíclicos de electrodeposición de óxido de manganeso (IV), obtenidos con cada método propuesto, contra el voltamograma obtenido utilizando un equipo profesional. Los resultados obtenidos con ambos métodos muestran errores similares a la hora de calcular el ancho de pulso de la señal PWM para un voltaje de celda deseado, mientras que los voltamogramas obtenidos presentan, en general, formas similares a la obtenida con el potenciostato profesional, no obstante, con niveles de ruido mayores.

ABSTRACT

In this work, a comparative analysis is conducted between two different methods to calculate the operational parameters of an Arduino-based potentiostat, namely, the pulse width of a PWM signal, the cell's voltage and the cell's current. The adjust process of the potentiostat is described, by which the calibration curves are obtained. Moreover, to evaluate the precision of each method in the calculation of the cell's voltages and currents, the cyclic voltammograms of the manganese (IV) oxide are compared with that obtained with

a professional potentiostat. Results show similar errors related to each method during the calculation of the pulse width associated with a desired cell voltage. Additionally, the obtained voltammograms show similar shapes compared with that generated by the professional equipment, but with higher levels of noise.

I. INTRODUCCIÓN

El potenciostato es un instrumento de medición utilizado en investigaciones electroquímicas como lo son la evaluación de baterías, el estudio de supercapacitores, el desarrollo de nuevos materiales, estudios de reacciones químicas y el análisis químico cuantitativo. Tradicionalmente, el potenciostato se utiliza en conjunto con una celda electroquímica, la cual está constituida por tres electrodos sumergidos en una disolución electrolítica. El potenciostato permite al usuario establecer un voltaje conocido entre un electrodo de trabajo (WE) y un electrodo de referencia (RE), mientras que la corriente fluye entre el electrodo de trabajo (WE) y un tercer electrodo llamado auxiliar o contador (CE). Durante los experimentos, el equipo registra el voltaje aplicado, la corriente y, cuando es requerido, también el tiempo transcurrido durante la prueba [1].

El elevado precio de los potenciostatos comerciales, y el aumento de la popularidad de tarjetas microcontroladoras tipo Arduino, ha promovido la publicación de trabajos científicos que proponen la construcción de potenciostatos de bajo costo para su uso en docencia e investigación. Meloni [2] propuso la construcción de un potenciostato controlado por una tarjeta Arduino UNO y energizado por varias fuentes de alimentación. Siguiendo una línea similar, Li et al. [3] presentaron la construcción de un potenciostato alimentado por una única fuente de alimentación y operado desde un programa escrito en LabView. Por su parte, Cordova-Huaman et al. [4] describieron la construcción de un potenciostato basado en una tarjeta Arduino Nano y controlado desde un teléfono celular, mejorando así la portabilidad del instrumento. Por su parte, Elias [5] presentó la construcción de una versión mejorada del potenciostato propuesto por Li et al. [3] y proporcionó varios experimentos que se pueden llevar a cabo con este instrumento.

En los potenciostatos controlados por tarjetas Arduino, equipados con salidas que permiten generar señales con modulación por ancho de pulso (PWM), donde el ancho del pulso se controla mediante un registro de 8 bits, el voltaje de celda requerido por un determinado experimento es establecido por el usuario a través del ancho de pulso de la señal PWM, la cual se envía a uno de los pines digitales de la tarjeta Arduino. Para esto, se escribe en el programa de control un número entero entre 0 y 255 correspondiente al voltaje de celda deseado. Por su parte, durante la ejecución del experimento, el voltaje de celda y la corriente de celda son calculados a partir de los valores leídos en los puertos analógicos de la tarjeta Arduino. Por lo tanto, para utilizar el potenciostato se requiere de algún método que permita calcular el ancho de pulso correspondiente a un cierto voltaje de celda, así como el voltaje y la corriente de celda a partir de los valores leídos en los puertos analógicos, los cuales se denominan parámetros operativos. En publicaciones realizadas por este grupo de investigación [6, 7], se muestran dos metodologías distintas para realizar estos cálculos. La primera se basa en ecuaciones deducidas a partir del circuito de control del potenciostato, y la

segunda requiere de interpolaciones en curvas de calibración previamente estimadas en una etapa de ajuste del potencióstato.

Hasta ahora no se tiene claridad sobre cuál método de cálculo es más ventajoso. El uso de ecuaciones electrónicas evita tener que realizar una etapa de ajuste previa del potencióstato, sin embargo, requiere de un constante monitoreo de parámetros que no necesariamente están fácilmente disponibles para el usuario, como lo son: el voltaje de trabajo (V_{WE}) y el voltaje de alimentación de 5 V generado por la fuente de la tarjeta Arduino (V_{5V}). Por su parte, el uso de curvas de calibración no requiere conocer con antelación los valores de V_{5V} ni V_{WE} , no obstante, se debe efectuar la etapa de ajuste de forma periódica.

En el presente trabajo investigativo, se lleva a cabo la comparación de los dos métodos de cálculo de los parámetros operativos de un potencióstato controlado por una tarjeta Arduino UNO. Se realiza una descripción del proceso de ajuste del potencióstato para obtener las curvas de calibración, y se evalúa la exactitud del voltaje de celda obtenido a partir de los valores de ancho de pulso estimados por cada método. Además, con el fin de evaluar la precisión de los voltajes de celda y las corrientes de celda arrojados por cada metodología de cálculo, se comparan los voltamogramas cíclicos de electrodeposición de óxido de manganeso (IV), obtenidos con cada método propuesto, contra el voltamograma obtenido utilizando un equipo profesional.

II. METODOLOGÍA

A. Ajuste del potencióstato

Inicialmente, es necesario obtener un juego de tres curvas de calibración para el potencióstato que se utilizará en este trabajo, mismo que se describe en [7], a partir de las cuales se obtienen relaciones lineales que permitirán calcular los siguientes parámetros operativos:

- El ancho de pulso de la señal PWM () requerido para establecer un cierto voltaje de celda.
- El voltaje de celda a partir del valor leído a través del puerto A0 del Arduino.
- La corriente de celda a partir del valor leído a través del puerto A1 del Arduino.

Con el fin de obtener estas tres curvas, se conecta primero una resistencia de carbón de $5.1\text{ k}\Omega$ (R_L) entre los electrodos contador y trabajo del potencióstato, mientras que el electrodo de referencia y el de contador se conectan a un mismo nodo. Se mide el valor real de R_L con un ohmímetro y se registra el valor obtenido. El voltaje en R_L se mide con un voltímetro, conectando la punta de medición positiva al electrodo de trabajo y la negativa al nodo donde se encuentran los electrodos contador y referencia. Luego se ejecuta el programa de ajuste con el cual se aplica, durante algunos segundos, una señal PWM con anchos de pulso () entre 0 y 255, en intervalos de 17 unidades, a través de la terminal D9 de la placa Arduino. El voltímetro mostrará un valor de voltaje de celda (V_c) distinto para cada valor de . 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 leídos a través de los puertos A0 y A1 de la placa Arduino, durante la segunda ejecución del programa, se transfieren a una hoja electrónica y se calculan los valores promedio en cada caso, para cada ancho de pulso. Para cada ancho de pulso, se calcula la corriente de celda (I_c) utilizando la ley de Ohm y los valores de V_c y R_L . Luego, las curvas de calibración se obtienen al graficar V_c contra el ancho de pulso de la señal PWM; V_c contra el valor de A0; y el valor de A1 contra I_c . Posteriormente, se calculan las rectas de mejor ajuste en cada caso, para obtener así tres ecuaciones: V_c en función del ancho de pulso; V_c en función del valor de A0; y finalmente, el valor de A1 en función de I_c . La primera ecuación permite calcular el ancho de pulso necesario para establecer un voltaje de celda deseado. La segunda y la tercera ecuación permiten obtener el voltaje de celda y la corriente de celda a partir de los valores leídos a través de los puertos A0 y A1, respectivamente, los cuales se registran durante cada experimento electroquímico.

B. Evaluación de los métodos seleccionados en el ajuste del voltaje de celda

En esta prueba se desean comparar los dos métodos disponibles para calcular el ancho de pulso de la señal PWM () que debe ser aplicado al circuito de control para establecer un cierto voltaje de celda deseado. El primer método consiste en calcular el ancho de pulso de la señal PWM a través de la ecuación planteada en [6], la cual establece lo siguiente:

$$L_{PWM} = \left\lceil \frac{255(V_{WE} - V_{Celda})}{V_{5V}} \right\rceil \quad (1)$$

Donde es el ancho de pulso requerido, es el voltaje del electrodo de trabajo, es el voltaje suministrado por la fuente de alimentación de la placa Arduino, es el voltaje de celda que se desea establecer y indica el redondeo al entero más cercano. El segundo método de cálculo consiste en obtener el valor de a partir de la curva de calibración correspondiente, la cual se obtuvo a partir del procedimiento descrito en la sección anterior.

La evaluación de estos dos métodos se realiza a partir del porcentaje de error que se registre entre el voltaje de celda deseado y el voltaje de celda medido experimentalmente. Para ello se definen ocho valores para el voltaje de celda deseado, entre -2 V y $+2\text{ V}$, y para cada uno de ellos, se calcula el ancho de pulso requerido con cada uno de los métodos en estudio. Luego, se ajusta el programa de la placa Arduino y se aplica la señal PWM respectiva al circuito de control para así establecer un voltaje en una celda ficticia formada por una resistencia de $5.1\text{ k}\Omega$, manteniendo el electrodo contador y el de referencia conectados a un mismo nodo. Posteriormente, se mide experimentalmente el voltaje establecido en la celda ficticia, a través de un voltímetro externo, y se registran los resultados.

C. Evaluación de los métodos seleccionados en la voltametría del MnO_2

Con el fin de estudiar los dos métodos disponibles para estimar el voltaje y la corriente de celda a partir de los valores leídos en los puertos A0 y A1, para una prueba electroquímica, se realiza la voltametría cíclica del MnO_2 por medio del potenciostato en estudio. Previo a la realización de la voltametría

cíclica, y siguiendo el procedimiento recomendado en [8], se preparan dos electrodos de acero inoxidable para que actúen como electrodos de trabajo, con superficies de exposición de 4 cm^2 , y en ellos se crean depósitos de dióxido de manganeso (IV), utilizando el potenciostato comercial PalmSens 4.

Posteriormente, se realiza la voltametría cíclica con cada uno de los electrodos anteriores, con el objetivo de comparar la forma de los voltamogramas resultantes. En ambos casos se utiliza una celda electroquímica construida a partir de un vaso de precipitados, donde se colocan 140 mL de Na_2SO_4 0.5 molL^{-1} como electrolito, sin agitación. Así mismo, se utiliza un electrodo comercial de Ag/AgCl (KCl 1.0 molL^{-1}) como electrodo de referencia, y una espátula de laboratorio acanalada como electrodo contador. El voltaje de celda aplicado es un barrido lineal con los siguientes parámetros: voltaje mínimo de $+0.4 \text{ V}$; voltaje máximo de $+0.8 \text{ V}$; velocidad de barrido de 10 mVs^{-1} , y número de ciclos igual a 15.

La primera voltametría se realiza con el mismo potenciostato comercial (PalmSens 4), con el fin de obtener un voltamograma de referencia. Después, la segunda voltametría se realiza con el potenciostato propuesto, y los datos recibidos desde la placa Arduino se procesan con los dos métodos de cálculo disponibles. Primero, el voltaje y la corriente de celda se calculan mediante las ecuaciones presentadas en [6], para luego obtener el voltamograma correspondiente. Segundo, el voltaje y la corriente de celda se obtienen por medio de las curvas de calibración obtenidas previamente, y a partir de estos datos, se obtiene un voltamograma adicional. Finalmente, los dos voltamogramas obtenidos con el potenciostato propuesto se comparan contra el voltamograma de referencia arrojado por el potenciostato comercial, para así analizar aspectos como la forma general de las gráficas y el nivel de ruido en las mediciones.

III. RESULTADOS

El objetivo de la etapa de ajuste del potenciostato es obtener las ecuaciones de las curvas de mejor ajuste de los datos obtenidos durante dicha etapa. Estas ecuaciones son necesarias para realizar el cálculo de los parámetros operativos del potenciostato: L_{PWM} , V_c e I_c . Las gráficas obtenidas se muestran en la Fig. 1. En las tres se observa que los parámetros mostrados presentan una relación lineal entre sí. Así mismo, en la Fig. 1a, se aprecia que al aumentar el ancho de pulso de la señal PWM (L_{PWM}), disminuye el voltaje de celda. Esto se debe a que en el diseño seguido para construir el potenciostato [6], el voltaje del electrodo de referencia (V_{RE}) sigue al voltaje aplicado en la entrada del amplificador operacional que sirve como regulador de voltaje. Además, tomando en cuenta que el voltaje del electrodo de trabajo (V_{WE}) es constante y cercano a 2.5 V , y que el voltaje de celda está definido como $V_{\text{WE}} - V_{\text{RE}}$, es de esperar que un aumento en el voltaje del electrodo de referencia produzca voltajes de celda menores. Otro detalle importante para destacar en la Fig. 1a, es la correcta selección del valor de R_L de $5.1 \text{ k}\Omega$, el cual permitió utilizar todo el ámbito de valores disponibles del ancho de pulso (de 0 a 255). De haberse utilizado una resistencia menor, esto no habría sido posible debido a los efectos del factor resistivo sobre la capacidad del equipo para obtener un voltaje de celda deseado [6]. Debido a lo anterior, fue posible alcanzar los valores máximo y mínimo de los voltajes de celda, tal y como se aprecia en la Fig. 1b. Por su parte,

en la Fig. 1c, se observa que las corrientes de celda alcanzadas durante la etapa de ajuste variaron entre $-500 \mu\text{A}$ y $+500 \mu\text{A}$, aproximadamente. Estos valores se acercan al máximo y al mínimo de corrientes de celda esperados durante la voltametría cíclica del MnO_2 .

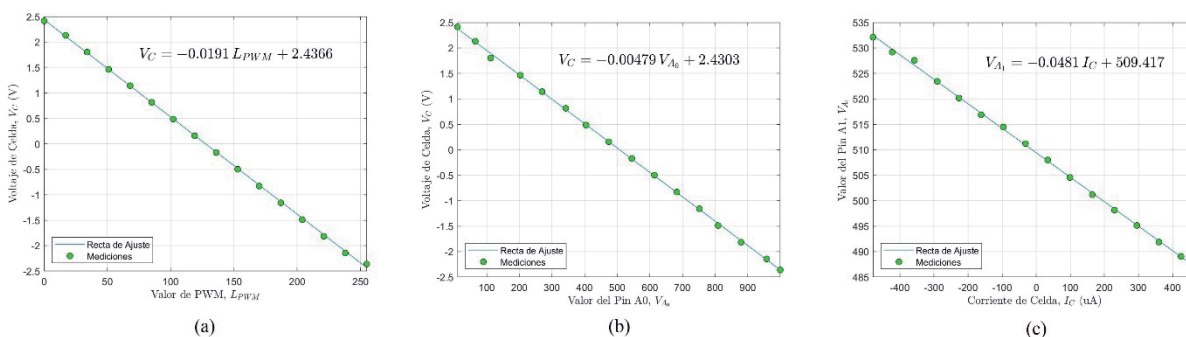


Fig. 1. Curvas de calibración obtenidas para el potenciostato en estudio. (a) Voltaje de celda contra . (b) Voltaje de celda contra valor de A0. (c) Valor de A1 contra corriente de celda.

Los voltajes de celda calculados a partir de las dos metodologías evaluadas se muestran en el CUADRO I. A partir de estos resultados no es posible detectar una clara ventaja de un método sobre el otro. Por ejemplo, el método de las curvas de calibración produjo porcentajes de error menores en tres de los ocho voltajes evaluados. Por su parte, las ecuaciones deducidas a partir del análisis del circuito de control presentaron porcentajes de error menores en dos de los ocho voltajes evaluados. En los tres voltajes restantes, se obtuvo el mismo porcentaje de error con ambas metodologías. Otro detalle para destacar es que las curvas de calibración produjeron el mayor porcentaje de error, el cual fue de un 3% para un voltaje de celda de -2.00 V . No obstante, dicho error se considera aceptable para el equipo que se está evaluando.

CUADRO I
VOLTAJES DE CELDA ESTABLECIDOS A PARTIR DE ANCHOS DE PULSO PARA LA SEÑAL PWM OBTENIDOS CON DOS MÉTODOS DISTINTOS

Voltaje de Celda Esperado (V)	Ancho de Pulso	Ecuaciones		Curvas de Calibración		
		Voltaje de Celda Aplicado (V)	% Error	Ancho de Pulso	Voltaje de Celda Aplicado (V)	% Error
-2.00	234	-1.99	0.50	232	-1.94	3.00
-1.50	207	-1.49	0.67	206	-1.49	0.67
-1.00	181	-1.01	1.00	180	-1.00	0.00
-0.50	154	-0.50	0.00	153	-0.49	2.00
+0.50	101	+0.51	2.00	101	+0.51	2.00
+1.00	75	+1.01	1.00	75	+1.01	1.00
+1.50	48	+1.54	2.67	49	+1.52	1.33
+2.00	22	+2.04	2.00	23	+2.02	1.00

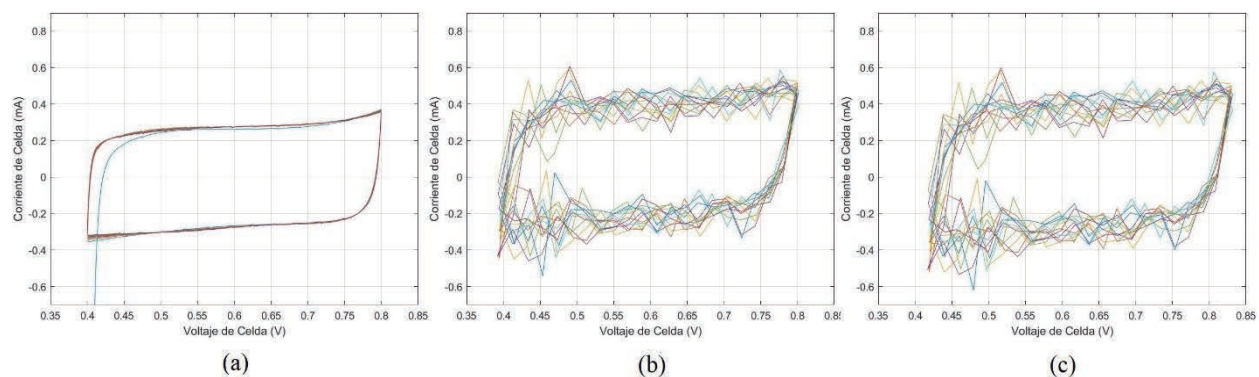


Fig. 2. Voltamogramas cíclicos del MnO_2 depositado sobre placas de acero inoxidable utilizando: (a) El potenciostato PalmSens 4. (b) El potenciostato bajo estudio y operado con curvas de calibración. (c) El potenciostato bajo estudio y operado con las ecuaciones deducidas en [6].

Por otro lado, los voltamogramas cíclicos de los electrodepositos de MnO_2 se presentan en la Fig. 2. La Fig. 2a muestra los quince ciclos registrados con el equipo comercial. Aquí es posible apreciar gráficas bien definidas con la forma semi rectangular característica del **óxido de manganeso (IV)**, la cual ha sido asociada con las propiedades pseudocapacitivas de dicho compuesto [8]. Por su parte los voltamogramas obtenidos con el potenciostato propio, utilizando tanto curvas de calibración como ecuaciones, muestran la forma general del voltamograma esperado. No obstante, en ambos casos, las gráficas presentan un nivel apreciable de ruido experimental. Esto se debe principalmente al hecho de que, para la presente investigación, no se ha recurrido a ninguna estrategia orientada a la mitigación del ruido. Por ejemplo, el circuito de control del potenciostato se trabajó en un tablero de prototipos, en lugar de implementar un circuito impreso, que hubiera sido lo ideal. Tampoco se llevó a cabo una selección minuciosa de los datos de A0 o A1, registrados para cada valor de ancho de pulso, que hubiera quizás permitido eliminar posibles datos espurios.

Es importante mencionar el ligero corrimiento en el voltaje de celda presentado por los voltamogramas de la Fig. 2c, obtenidos a partir de las ecuaciones, el cual podría deberse a cambios en los valores del voltaje del electrodo de trabajo (V_{WE}) o del voltaje arrojado por la fuente de alimentación de 5 V de la tarjeta Arduino (V_{5V}). Estos cambios quizás son promediados por el método de las curvas de calibración durante la etapa de ajuste del equipo.

CONCLUSIONES

El uso extendido de los potenciostatos como instrumentos de medición en los procesos de enseñanza e investigación, así como sus elevados precios, han traído consigo la creación de propuestas orientadas a la construcción de equipos de código abierto, algunos de ellos controlados por tarjetas electrónicas tipo Arduino. La puesta en marcha de estos equipos requiere el cálculo de parámetros operativos como el valor del ancho de pulso aplicado, el voltaje de celda y la corriente de celda. Bajo esta línea, nuestro trabajo de investigación se ha enfocado en evaluar dos metodologías distintas para realizar dichas estimaciones: el uso de curvas de calibración y la aplicación ecuaciones electrónicas. En el presente trabajo se realizaron pruebas experimentales con el fin de reconocer las ventajas y desventajas de cada método, y de ser posible, demostrar la conveniencia

de una metodología sobre la otra. Los resultados obtenidos durante el establecimiento de voltajes de celda demostraron que con ambas metodologías es posible establecer voltajes de celda deseados con porcentajes de error menores al 3%. Una conclusión similar se obtuvo a partir de los resultados arrojados por las voltametrías cíclicas del MnO_2 , en donde con ambos métodos se logró obtener la forma general esperada de los voltamogramas para dicho compuesto. La presencia de ruido experimental en las gráficas obtenidas en esta última prueba, se le achacó a la construcción misma del potencióstato y a la ausencia de estrategias de mitigación de ruido. Se presenta por lo tanto la necesidad de continuar trabajando en esta línea para mejorar la calidad de los resultados y de esta forma impulsar el uso de este tipo de equipos en el ámbito académico y profesional.

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] T. W. Zuben, A. G. Salles y J. A. Bonacin, “Low-cost Open-source Potentiostats: A Comprehensive Review of DIY Solutions and Fundamental Concepts of Electronics and its Integration with Electrochemistry”, *Electrochimica Acta*, vol. 498, no. 144619, 2024, doi: 10.1016/j.electacta.2024.144619.
- [2] G. N. Meloni, “Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation”, *J. Chem. Educ.*, vol. 93, no. 7, pp. 1320-1322, 2026, doi: 10.1021/acs.jchemed.5b00961.
- [3] Y. C. Li, E. L. Melenbrink, G. J. Cordonier, C. Boggs, A. Khan, M. K. Isaac, L. K. Nkhonjera, D. Bahati, S. J. Billinge, S. M. Haile, R. A. Kreuter, R. M. Crable y T. E. Malloukm, “An Easily Fabricated Low-Cost Potentiostat Coupled with User-Friendly Software for Introducing Students to Electrochemical Reactions and Electroanalytical Techniques”, *J. Chem. Educ.*, vol. 95, no. 9, pp. 1658-1661, 2018, doi: 10.1021/acs.jchemed.8b00340.
- [4] 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, pp. 1-7, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e06259.
- [5] J. S. Elias, “An Improved Potentiostat / Galvanostat for Undergraduate-Designed Electro-chemical Laboratories”, *J. Chem. Educ.*, vol. 101, no. 4, pp. 1703-1710, 2024, doi: 10.1021/acs.jchemed.3c01044.
- [6] A. Delgado Castro, O. Rojas Bolaños, “Estudio del circuito de control para un potencióstato con una sola fuente de alimentación”, *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 35, no. 1, pp. 42-52, 2025, doi: 10.15517/ri.v35i1.59198.
- [7] A. Delgado Castro, O. Rojas Bolaños, “Análisis Comparativo de un Potencióstato de Bajo Costo Basado en Arduino”, *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 35 NE5, pp. 120-127, 2024, doi: 10.15517/ri.v35iNE5.63450.
- [8] F. Licht, G. A. Milán y H. A. Andreas, “Bringing Real-World Energy-Storage Research into a Second-Year Physical-Chemistry Lab Using a MnO_2 -Based Supercapacitor”, *J. Chem. Educ.*, vol. 95, no. 11, pp. 2028-2033, 2018, doi: 10.1021/acs.jchemed.8b00454.

Avances en Robótica y Automatización

Implementación y Validación de Algoritmos de Seguimiento de Trayectorias para un Robot Kinova de 7 Grados de Libertad (7DoF)

Implementation and Validation of Trajectory Tracking Algorithms for a 7-Degree-of-Freedom (7DoF) Kinova Robot

Jimena Sancho Céspedes

Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: jimena.sancho@ucr.ac.cr

Ing. Leonardo José Marín Paniagua, PhD.

Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: leonardo.marin@ucr.ac.cr

ORCID 0000-0002-8986-642X

Palabras clave:

Robot Kinova, cinemática directa, cinemática inversa, D-H, algoritmos de seguimiento de trayectorias, validación experimental, MATLAB

RESUMEN

Esta investigación tiene como principal objetivo la implementación y validación de algoritmos de seguimiento de trayectorias para un robot Kinova de 7 grados de libertad (7DoF). Para conseguirlo, se desarrolla un modelo cinemático directo teórico representativo e inverso que permiten comprender el comportamiento del manipulador en diferentes configuraciones.

El modelo de la cinemática inversa se implementa y simula en MATLAB, con el fin de generar una trayectoria que pueda ser seguida por el robot. Posteriormente, los resultados obtenidos se comparan con pruebas experimentales realizadas en el robot físico con el propósito de evaluar la precisión del sistema y la eficiencia de los algoritmos.

Dicha evaluación contribuye al desarrollo de herramientas confiables para el control de trayectorias en brazos robóticos, lo cual puede tener aplicaciones en áreas como la automatización industrial, la robótica y la investigación académica.

ABSTRACT:

This research aims primarily at the implementation and validation of trajectory tracking algorithms for a Kinova robot with 7 degrees of freedom (7DoF). To achieve this, a representative theoretical model of both forward and inverse kinematics is developed to understand the behavior of the manipulator in different configurations.

The inverse kinematics model is implemented and simulated in MATLAB, with the goal of generating a trajectory that the robot can follow. Subsequently, the results obtained are compared with experimental

tests conducted on the physical robot in order to evaluate the accuracy of the system and the efficiency of the algorithms.

This evaluation contributes to the development of reliable tools for trajectory control in robotic arms, which may have applications in areas such as industrial automation, robotics, and academic research.

I. INTRODUCCIÓN

A la cinemática es una rama de la física que estudia el movimiento de los objetos sólidos sin considerar la causa del mismo, como los torques o fuerzas [1]; por lo tanto, el presente proyecto tiene como objetivo la implementación y validación de algoritmos de seguimiento de trayectorias para un robot Kinova Gen3 de 7 grados de libertad (7DoF) [2]. Para ello, se desarrolla una modelación cinemática completa que incluye el estudio teórico de la cinemática directa, la cual puede entenderse como la referencia en la que las variables articulares (ángulos de orientación) de cada eslabón son respecto a un eje en particular, o bien, con respecto a un eslabón anterior, y que según sus valores conocidos permiten encontrar la posición y orientación del efector final [3]. Por otro lado, dichos cálculos se realizan por medio de los parámetros Denavit-Hartenberg (D-H) para calcular la matriz de rotación final.

Además, el cálculo de la cinemática inversa, en donde se conoce la posición del efector final y se debe determinar las variables articulares para llegar a esta postura, se aborda mediante un enfoque geométrico y simbólico, fundamentado en el desarrollo teórico de [4], así como en metodologías prácticas presentadas en recursos especializados [5] y [6]. En este análisis primero se descompone el problema en dos partes principales: el posicionamiento del centro de la muñeca (primeros 3 DoF), mediante la construcción de un triángulo geométrico en el plano $r-s$, y la orientación del efector final (últimos 4 DoF), modelada a partir de una secuencia de rotaciones tipo $Z-Y-Z-Z$.

Finalmente, el modelo de la cinemática inversa se implementa y simula en MATLAB para generar una trayectoria circular y cuadrada que posteriormente se valida mediante pruebas experimentales con el robot físico ubicado en el Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR. Dicha comparación permite evaluar la precisión de los resultados y la efectividad de los algoritmos desarrollados, contribuyendo al diseño de soluciones confiables para el control de trayectorias en aplicaciones de automatización y robótica.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este trabajo se divide en tres partes principales: el modelado cinemático, implementación computacional (MATLAB) y validación experimental (robot físico). Cada etapa se describe a continuación con el objetivo de establecer un proceso sistemático para el desarrollo y evaluación de algoritmos de seguimiento de trayectorias en un robot Kinova Gen3 de 7 grados de libertad (7DoF).

A. Modelado cinemático teórico

Para este apartado se inicia desde el análisis estructural del manipulador Kinova para construir un modelo matemático que represente su comportamiento espacial. Esta etapa incluye:

Modelo de cinemática directa: Se obtiene a partir del producto de matrices homogéneas de los parámetros Denavit-Hartenberg proporcionados por el fabricante. Dicho planteo permite calcular la posición y orientación del efector final dado un conjunto de ángulos articulares.

Modelo de cinemática inversa: Se plantea mediante un enfoque simbólico y geométrico, basado en el libro [4]. El problema se divide en dos partes:

- Posicionamiento del centro de la muñeca (primeros 3 DoF), utilizando triángulos proyectados en el plano $r-s$ para determinar los ángulos articulares q_1, q_2 y q_3 .
- Orientación del efector final (últimos 4 DoF), modelada como una secuencia de rotaciones $Z-Y-Z$, a partir de la cual se extraen los ángulos q_4 a q_7 mediante relaciones trigonométricas.

B. Descripción del algoritmo de seguimiento de trayectorias

El algoritmo de seguimiento de trayectorias utilizado tiene como objetivo generar una secuencia de posiciones y orientaciones (posturas) deseadas para el efector final del robot al momento de resolver la cinemática inversa para cada una de las posiciones y enviar los comandos articulares correspondientes mediante el Matlab API KORTEx [7]. Este proceso ayuda a ejecutar trayectorias continuas tanto en simulación como en el robot físico, garantizando una respuesta precisa y fluida.

El procedimiento general consiste en definir primero una trayectoria deseada a través de puntos de referencia o *waypoints* en el espacio cartesiano. Para cada uno de esos puntos se calcula la posición y orientación objetivo del efector final, se resuelve la cinemática inversa para obtener los ángulos articulares correspondientes y se envía el comando al robot físico a través de la API. Se muestra a continuación el detalle para la generación de las trayectorias de referencia:

```
% Trayectoria circular
center = [0.5 0 0.4];
radius = 0.1;
dt = 0.25;
t = (0:dt:10)';
theta = t*(2*pi/t(end)) - pi/2;
points = center + radius * [0*ones(size(theta)) cos(theta) sin(theta)];

% Trayectoria cuadrada
center = [0.5 0 0.4];
side = 0.1;
points = [
    center + [0, side/2, side/2];
    center + [0, side/2, -side/2];
    center + [0, -side/2, -side/2];
    center + [0, -side/2, side/2];
```

```

center + [0, side/2, side/2];
];
% Define timing
% numSteps = size(points,1);
dt = 10; %0.25/ (numSteps - 1);
t = linspace(0, 10, 5)';

```

Algoritmo 1: Definición de trayectorias circular y cuadrada en MATLAB

III. RESULTADOS

A. Modelo de cinemática directa

Ahora bien, se parte de la matriz de transformación homogénea de Denavit-Hartenberg (D-H):

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Considerando los parámetros Denavit-Hartenberg proporcionadas por el manual de usuario [2]:

CUADRO I
PARÁMETROS D-H DATOS DEL MANUAL DE
USUARIO DEL ROBOT KINOVA DE 7 DoF

i	α_i (rad)	a_i (m)	d_i (m)	θ_i (rad)
0 (<i>from base</i>)	π	0.0	0.0	0
1	$\pi/2$	0.0	$-(0.1564 + 0.1284)$	q_1
2	$\pi/2$	0.0	$-(0.0054 + 0.0064)$	$q_2 + \pi$
3	$\pi/2$	0.0	$-(0.2104 + 0.2104)$	$q_3 + \pi$
4	$\pi/2$	0.0	$-(0.0064 + 0.0064)$	$q_4 + \pi$
5	$\pi/2$	0.0	$-(0.2084 + 0.1059)$	$q_5 + \pi$
6	$\pi/2$	0.0	0.0	$q_6 + \pi$
7 (<i>to interface</i>)	$\pi/2$	0.0	$-(0.1059 + 0.0615)$	$q_7 + \pi$

Finalmente, la matriz de la cinemática directa teórica se obtiene al ingresar las filas de la tabla 1 en la ecuación 1 y multiplicar las respectivas matrices, mediante la ecuación 2:

$$T_0^7 = T_0 \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_5 \cdot T_6 \cdot T_7 \quad (2)$$

B. Modelo de cinemática inversa

El desarrollo del modelo de cinemática inversa se basó en un enfoque geométrico y simbólico

fundamentado teóricamente en [4], y complementado con recursos audiovisuales en [5] y [6]. La solución se divide en dos partes detalladas a continuación.

B.1. Posicionamiento del centro de la muñeca (primeros 3 DoF)

Se inicia por el cálculo del vector de posición del efector deseado, $\vec{p}_w = [p_x, p_y, p_z]^T$, y se descompone en un triángulo en el plano horizontal (r) y vertical (s):

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}, \quad s = p_z \quad (3)$$

Con dichas proyecciones se forma un triángulo con los eslabones a_2 y a_3 , permitiendo aplicar relaciones trigonométricas para obtener los siguientes ángulos:

$$\begin{aligned} q_1 &= \text{atan2}(p_y, p_x) \\ D &= \frac{r^2 + s^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \Rightarrow q_3 = \text{atan2}\left(\pm\sqrt{1 - D^2}, D\right) \\ \phi &= \text{atan2}(s, r), \quad \beta = \text{atan2}(a_3 \sin(q_3), a_2 + a_3 \cos(q_3)) \Rightarrow q_2 = \phi - \beta \end{aligned} \quad (4)$$

B.2. Orientación del efector final (últimos 4 DoF)

La muñeca del robot se modela mediante una secuencia de rotaciones del tipo Z-Y-Z-Z:

$$R_3^7 = R_z(q_4) \cdot R_y(q_5) \cdot R_z(q_6) \cdot R_z(q_7) \quad (5)$$

Al multiplicar las matrices de rotación elementales y comparar con la rotación deseada R_0^7 , se extraen los ángulos mediante las siguientes expresiones:

$$q_5 = \text{atan2}\left(\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right), \quad q_4 = \text{atan2}(r_{23}, r_{13}), \quad q_6 = \text{atan2}(r_{32}, -r_{31}) \quad (6)$$

Para el ángulo adicional q_7 , que corresponde al séptimo grado de libertad redundante, se utiliza:

$$q_7 = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) \quad (7)$$

Este modelo extendido permite describir completamente la pose del efector final considerando los siete grados de libertad del robot.

B.3. Implementación computacional en MATLAB y validación experimental

Gracias a la implementación de los modelos y del código de seguimiento de trayectorias, se obtuvieron los resultados experimentales mostrados en las figuras de la 1 a la 4.

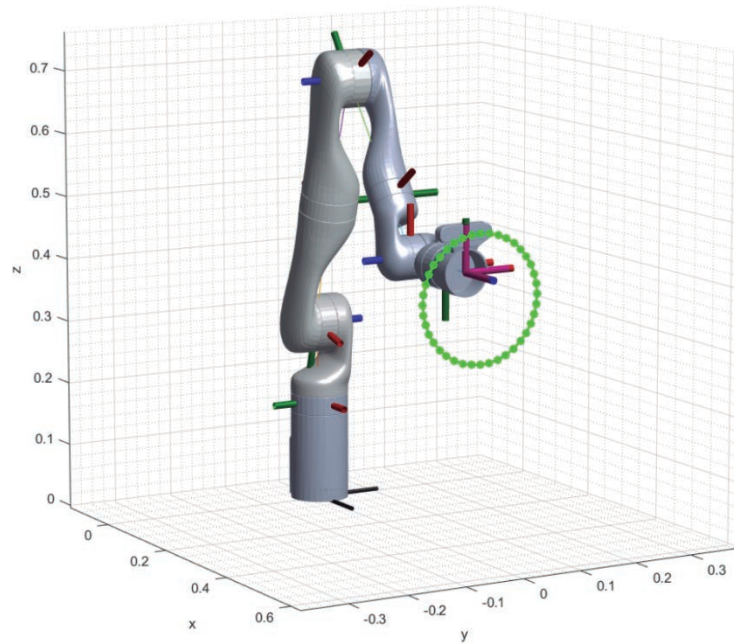


Fig. 1. Visualización de la trayectoria circular deseada y simulada para el efector final del robot Kinova Gen3 en el espacio cartesiano.

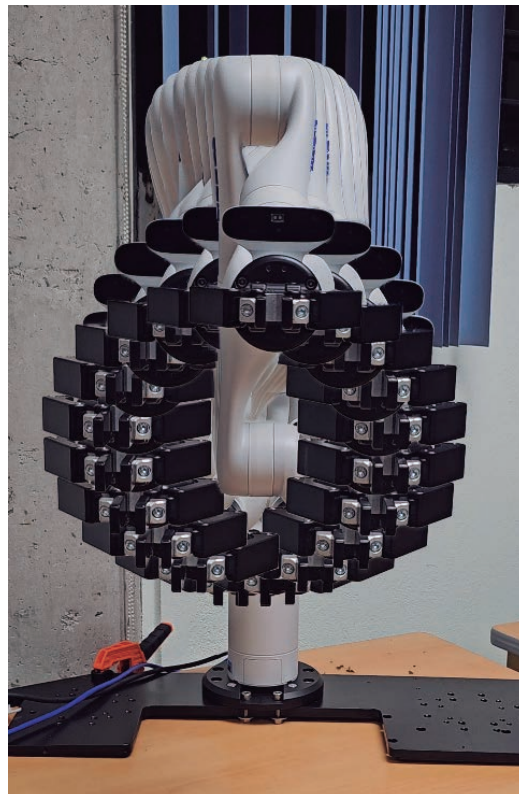


Fig. 2. Visualización de la trayectoria circular real para el efector final en el robot Kinova Gen3, composición fotográfica.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos ayudan a analizar la efectividad de los algoritmos de seguimiento de trayectorias implementados. En primer lugar, se desarrolló un modelo de cinemática directa de forma simbólica, donde se utilizaron los parámetros Denavit-Hartenberg proporcionados por el fabricante, lo que ayudó a representar de forma analítica la posición y orientación del efector final en función de las variables articulares q_i . Además, este desarrollo simbólico permitió validar una correcta estructura teórica del manipulador y también facilitó la deducción formal de la matriz de transformación total T_0^7 mediante el producto secuencial de las transformaciones homogéneas.

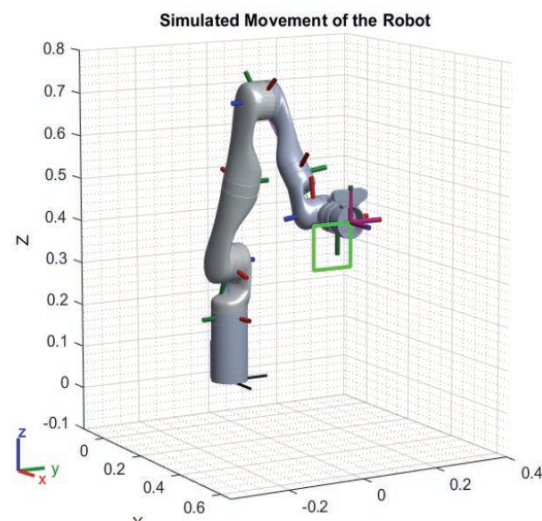


Fig. 3. Visualización de la trayectoria cuadrada deseada y simulada para el efector final en el robot Kinova Gen3 en el espacio cartesiano.



Fig. 4. Visualización de la trayectoria cuadrada real para el efector final en el robot Kinova Gen3, composición fotográfica.

En segundo lugar, se implementó el modelo de la cinemática inversa de forma teórica y también por medio de MATLAB. Es importante recordar que, para esta sección, lo que se hizo fue descomponer el robot en dos partes: la primera, donde se toman los primeros tres grados de libertad (q_1, q_2, q_3), y la segunda parte, donde se calcularon hasta el q_7 . Como base teórica, se implementó el procedimiento de [4], el cual también ayudó a justificar la forma en que se calcularon dichos parámetros, porque según [4], para robots con más de 6 grados de libertad, estos van a presentar grados redundantes, los cuales no son estrictamente necesarios para realizar una tarea en el plano cartesiano. Por lo tanto, esto valida el enfoque geométrico y simbólico adaptado para el robot Kinova Gen3 Lite en la resolución del modelo inverso.

Por otro lado, al momento de analizar la ejecución experimental de ambas trayectorias (circular y cuadrada), se evidencia un comportamiento consistente con el manipulador, lo cual demuestra la confiabilidad del algoritmo de seguimiento implementado. Para el caso de la trayectoria circular, se observó un desplazamiento suave y continuo del efector final, con cambios graduales en la orientación y sin oscilaciones notables. Esto evidencia que el algoritmo logra calcular correctamente los ángulos articulares en tiempo real, incluso cuando se requiere una interpolación densa de puntos.

Asimismo, la trayectoria cuadrada presentó características distintas debido a su naturaleza discontinua en los vértices (cuatro en total). En la simulación se observaron cambios abruptos y rápidos durante el movimiento, y al ejecutar dicha trayectoria con el robot se logró completarla exitosamente. No obstante, se notaron más oscilaciones en comparación con la trayectoria circular. A pesar de estas condiciones, los resultados demuestran que el controlador es capaz de adaptarse a geometrías complejas sin comprometer la estabilidad del sistema.

Estas observaciones permiten concluir que el modelo de cinemática inversa no solo es teóricamente correcto, sino que también es lo suficientemente robusto para ser aplicado en contextos prácticos con trayectorias variadas. En cuanto a la precisión observada en los movimientos del robot, los resultados permiten deducir que tanto la definición geométrica de los puntos de trayectoria, como la correcta temporización en MATLAB, fueron adecuadas para evitar comportamientos erráticos o pérdida de seguimiento.

Finalmente, la validación en el entorno físico con el robot Kinova Gen3 demostró que la integración entre el modelo simbólico de cinemática inversa, la resolución computacional en MATLAB y la comunicación con el hardware mediante la Matlab API KORTEX es efectiva y confiable. Esto crea una base sólida para futuros trabajos que involucren trayectorias más complejas y tareas de manipulación en entornos dinámicos.

CONCLUSIONES

Este proyecto logró implementar de forma satisfactoria los algoritmos de seguimiento de trayectorias para un robot Kinova Gen3 de 7 grados de libertad. Además, como parte fundamental del trabajo se desarrolló un modelo de cinemática directa simbólica que sirvió como sustento teórico para el análisis estructural del manipulador.

Por otro lado, la implementación en MATLAB se centró exclusivamente en el modelo de cinemática inversa, a partir del cual se lograron generar trayectorias que fueron posteriormente validadas de forma experimental. La similitud entre simulación y la ejecución real demuestra la efectividad del modelo de la cinemática inversa y la utilidad del enfoque geométrico aplicado.

Finalmente, este estudio permite evidenciar que es posible controlar el movimiento de un manipulador redundante mediante herramientas de análisis simbólico, completadas con simulaciones y validaciones reales. El trabajo desarrollado proporciona las bases adecuadas para futuras investigaciones que incorporen trayectorias simuladas para la cinemática directa o más complejas en la cinemática inversa.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, como parte de la ejecución del proyecto número 322-C5-011.

REFERENCIAS

- [1] MathWorks, *What is inverse kinematics?*, MATLAB - Simulink, 2025, dirección: <https://la.mathworks.com/discovery/inverse-kinematics.html>
- [2] Kinova, *Gen3 Ultra Lightweight User Guide*, Kinova, 2020. dirección: <https://artifactory.kinovaapps.com/ui/native/generic-documentation-public/Documentation/Gen3/Technical%20documentation/User%20Guide/EN-UG-014-Gen3-user-guide-r12.0.pdf>
- [3] R. S. Hartenberg y J. Denavit, *A Kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices*, Journal of Applied Mechanics, vol. 77, págs. 215-221, jun. de 1955.
- [4] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*, 1st. London: Springer-Verlag, 2009, págs. 88, 90-95.
- [5] Y. Cesar Chavez, *Ingeniería, Cinemática inversa de un robot de 6 GDL PRR+RRR (solución paso a paso)*, 2025. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=ooMc_V83xRs
- [6] Y. Cesar Chavez, *Ingeniería, Cinemática inversa. Método algebraico (ecuaciones simultaneas) vs método geométrico (Robot 3 DOF)*, 2025. Dirección: <https://youtu.be/hWtXYeBR9ZU?si=qJNlauHG55dkHOA>
- [7] MathWorks, *Track trajectory using inverse kinematics*, MATLAB - Simulink, 2025. dirección: <https://la.mathworks.com/help/robotics/robotmanipulator/ug/track-trajectory-inverse-kinematics.html>

Diseño, ensamblado, calibración e implementación de un sistema de control de Bola y Viga

Design, assembly, calibration and implementation of a Ball and Beam control system

Carlos Andrés Quesada Ortiz

*Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: carlos.quesadaortiz@ucr.ac.cr*

Ing. Leonardo José Marín Paniagua, PhD.

*Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: leonardo.marin@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Arduino, Bola y viga, control PID, MATLAB, modulación por ancho.

Keywords:

Arduino, Cyclic voltammetry, Electrodeposition, Potentiostat, Manganese (IV) oxide.

RESUMEN

Durante el presente trabajo de investigación se profundizó en el modelado y el diseño de un controlador PID para un sistema mecánico de bola y viga, donde el objetivo del control es mantener la bola en un punto de referencia, en este caso el centro de la viga. La función de transferencia de la planta se obtuvo a partir de una prueba de lazo abierto realizada en Arduino IDE, donde se aplicó una entrada escalón en la señal de control (PWM del motor) y se tomaron datos de la distancia medida por un sensor *Time of Flight*. Los datos recopilados fueron analizados por el software de Matlab *System Identification Toolbox* donde se obtuvo un modelo del sistema con una similitud del 87.75%. La herramienta utilizada para encontrar los parámetros del controlador PID, fue el *PID Tuning* de Matlab en base al modelo generado, lo que permitió obtener un control adecuado que estabiliza el sistema alrededor de los 7 segundos. Puesto que se trata de un problema de control muy famoso y reconocido, se tomaron varios artículos científicos como referencia y guía para el modelado y control.

ABSTRACT

The present work was focused on the modeling and design of a PID controller for a ball and beam system. The objective of the control is to maintain the ball at a reference point, in this case, the center of the beam. To achieve that, it was necessary to get a transfer function of the system, which was performed by an open-loop test on Arduino IDE. The data was recopilated with a software of Matlab *System Identification Toolbox*, which used it to get a model with a similarity of 87.75%. The tool used to find the PID controller parameters was Matlab's *PID Tuning*, which allowed obtaining an adequate control that stabilizes the system around

7 seconds. Since this is a very famous and recognized control problem, some scientific articles were taken as reference and guide for the modeling and control.

I. INTRODUCCIÓN

El sistema de bola y viga es uno de los problemas de control más clásicos y populares dentro del mundo de la automatización. Se trata de un problema que involucra análisis matemático, cinemático, mecánico, así como conocimientos en hardware y software. El objetivo del sistema es lograr equilibrar la bola en el centro de la viga, independientemente de dónde se coloque el balón y las perturbaciones que el usuario le pueda ocasionar. El control se realiza a partir de un servomotor que inclina la viga, que recibe órdenes de un microcontrolador Arduino y un sensor de distancia. A pesar de su simplicidad estructural, el modelo físico representa un reto significativo en términos de estabilidad y control, ya que la dinámica del sistema es naturalmente inestable: si no se aplica un control adecuado, la bola tiende a rodar fuera de la viga.

Dicho sistema, a pesar de ser muy famoso y reconocido, los kits de construcción que se venden al público suelen ser muy costosos, rondando los 300 euros [1], por lo que una elaboración propia permitiría a la Universidad de Costa Rica contar con una planta más económica para ser analizada, programada y controlada por los estudiantes del curso de Sistemas de Control (de la carrera de Ingeniería Eléctrica) en su proyecto final.

Por tanto, el objetivo general del trabajo consiste en realizar el diseño, el ensamblado, la calibración y la implementación de un sistema bola y viga, con su respectivo algoritmo de control para la regulación de perturbaciones y seguimiento de referencias, a fin de contar con una plataforma experimental apta para validación de algoritmos de control. En cuanto a los objetivos específicos, se incluye la obtención de un modelo matemático del sistema en su representación en ecuaciones diferenciales y sistema linealizado apto para el diseño de sistemas de control, identificando los respectivos parámetros del mismo; diseñar e implementar un control PID para regular el control de perturbaciones y cambios de referencia del sistema, mediante el uso del microcontrolador Arduino Uno R4 Wifi; comparar el desempeño de los métodos de control utilizados mediante la medición y el cálculo de distintos índices de funcionamiento, haciendo uso de la herramienta Matlab, y finalmente elaborar una memoria del proyecto y el manual de construcción que contenga una lista de todos los materiales, las estructuras y piezas utilizadas en el programa AutoCAD, los modelos, algoritmos, códigos y archivos utilizados para servir como guía de futuros proyectos. Este proyecto no solo permitirá profundizar en el análisis y diseño de sistemas de control, sino que también proporcionará un marco práctico para la implementación de técnicas avanzadas en sistemas dinámicos reales.

II. METODOLOGÍA.

La metodología del proyecto se divide principalmente en 3 secciones: la construcción de la planta, la obtención de la función de transferencia y el diseño e implementación del controlador utilizando las herramientas de MatLab y la plataforma Arduino IDE.

A. Descripción del sistema.

Se utilizaron materiales del sitio web de *Servocity* para la construcción de la estructura principal del sistema (plataforma de metal). Por otra parte, se diseñaron piezas adicionales para ensamblar los sensores a la viga y hacer el soporte del servomotor. También se diseñó la placa base de acrílico para montar sobre ella todos los componentes del sistema. Dichos modelos fueron diseñados en AutoCad y se cortaron sobre acrílico con una cortadora láser. Puesto que el acrílico se puede doblar con calor, algunas piezas requirieron el uso de una pistolade calor a 180 grados para el acrílico de 4mm (negro) y a 210 grados para el acrílico de 6 mm (azul), para realizar el acople adecuado. En cuanto al hardware, se utilizó el microcontrolador Arduino R4 WIFI, una fuente de alimentación de 5V, 12V y 24V de Arcity, un servomotor MG996R Metal Gear Servo, un servoshield Adafruit 16-Channel 12-bit PWM/Servo Shield - I2C interface (encargado de la modulación PWM del motor), y el sensor de distancia Adafruit VL53L4CD Time of Flight Distance Sensor, el cual se conectó al Arduino por medio del puerto STEMMA. Para la alimentación, se utilizó únicamente la salida de 5 V de la fuente para alimentar el Arduino y el Servoshield, ya que el servomotor requería de una fuente externa para poder cumplir con la corriente de 2,5 A necesaria para moverse. Se utilizó un brazo de 13 cm para ejercer el torque sobre la viga. El resultado visual del sistema y las piezas cortadas se muestran en la figura 1f.

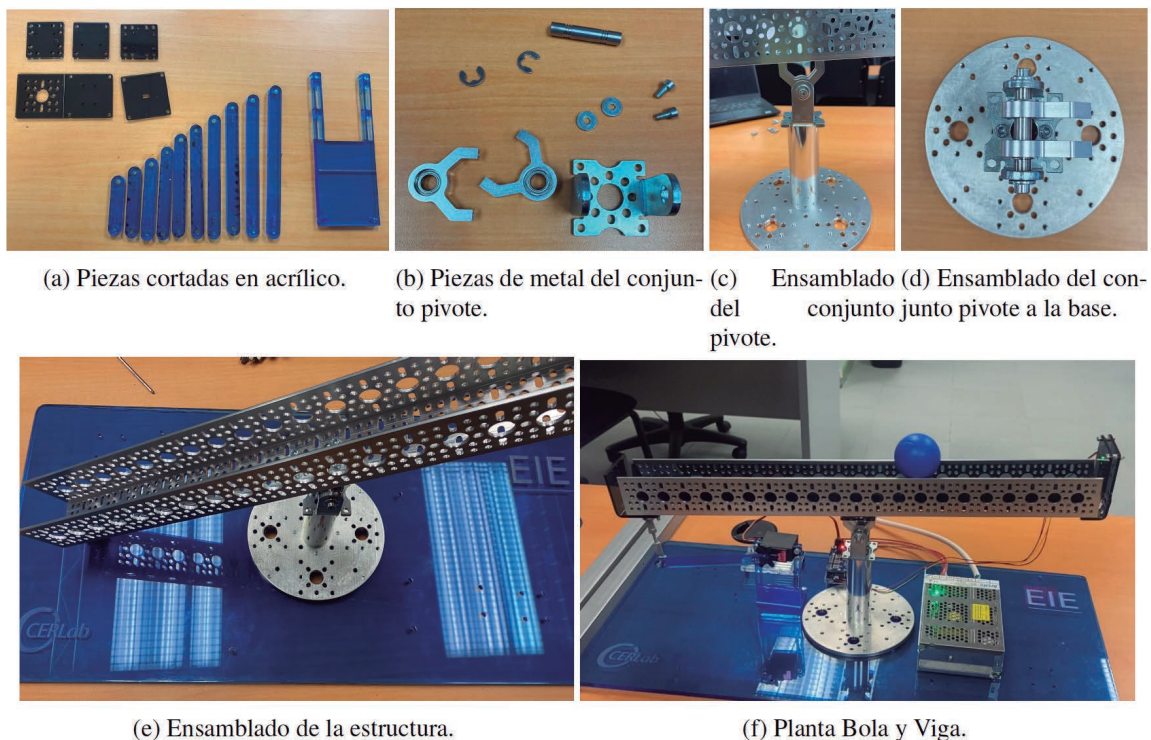


Fig. 1. Ensamblado del sistema.

B. Obtención del modelo matemático

La función de transferencia del sistema es fundamental para definir un método de control adecuado, y esta se obtiene generalmente mediante un análisis matemático del sistema. Una función de transferencia es una expresión que relaciona la salida del sistema con la entrada. En este caso, el objetivo es modificar la posición de la bola sobre la viga (salida) según el ángulo del servomotor (entrada), pues este definirá la inclinación de la viga que provocará el movimiento. El modelo matemático de Bola y Viga es un sistema muy famoso que posee una gran variedad de análisis mecánicos y matemáticos. A continuación, se presentarán algunos ejemplos y referencias:

La empresa Acrome INC desarrolló en el 2015 un sistema de control de Bola y Viga, donde se llegó al modelo matemático mediante análisis de ecuaciones de Lagrange. El método de Lagrange establece una ecuación diferencial de movimiento a partir de la relación entre energía cinética y energía potencial del sistema. Después de resolver la ecuación diferencial y realizar una linealización alrededor del punto de operación ($x=0$), se llegó a una función de transferencia de segundo orden, con un polo integrador y un polo real negativo [2]. De la misma manera, Maalini, M., Prabhakar, G. y Selvaperumal, S., obtienen un modelo del sistema de Bola y Viga mediante ecuaciones de Lagrange, sin considerar la fricción viscosa dentro del análisis de energías, por lo que obtuvieron una función de transferencia de doble integrador. [3]

En un artículo publicado en la IEEE por Asif, M., Usman, Z. y Zeeshan Shareef, Z. en 2011, se describe la dinámica del sistema mediante ecuaciones de análisis electromecánico, como torque proporcional a la corriente, fricción viscosa, etc. Puesto que se considera un motor DC como actuador para mover la viga, los autores obtienen el modelo del motor y de la viga por separado para luego unirlos en lazo abierto. El modelo del motor se describe como un sistema integrador de segundo orden y el modelo de la viga como un sistema con doble integrador. Al multiplicar las funciones de ambos modelos, se obtiene una función de transferencia que consiste de un triple polo en el origen y un polo real negativo, lo cual requiere de un complejo sistema de control y la consideración de varias reglas de sintonización. [4]

Finalmente, en una tesis para optar por el grado de Maestría publicada por Marta Viserda en el 2004, se obtienen las ecuaciones dinámicas del sistema a partir de un análisis de Newton y un análisis de Lagrange (como el mencionado anteriormente), estableciendo una relación entre la posición de la bola y el ángulo de la viga. En el método de Newton se analizan las fuerzas que actúan sobre la bola: la fuerza aplicada por el movimiento traslacional y la fuerza aplicada por la rotación de la bola. Es así como utilizando la segunda ley de Newton y el momento inercial de la bola, se llega a una función de transferencia con un doble integrador. [5]

Para este proyecto se utilizará como referencia el modelo integrador de segundo orden, debido a que representa un sistema potencialmente estable y con reglas de control más simples que un sistema de doble integrador. No obstante, a fin de obtener una respuesta más precisa y un modelo lo más similar posible al comportamiento real de la planta, se utilizó la herramienta de Matlab *System Identification Toolbox*, la cual permite obtener una función de transferencia de un sistema a partir de datos del comportamiento a lazo abierto (sin control). Para ello, se implementó un código en

Arduino IDE donde se aplicaba un cambio de tipo escalón en el PWM para mover el motor a un ángulo que permitiera a la bola deslizarse libremente. Este valor de PWM representa en realidad el rango máximo permitido por el control PID.

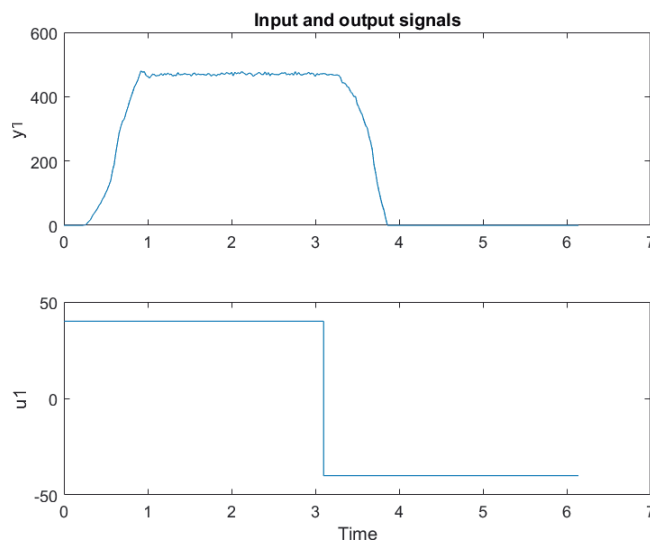


Fig. 2. Respuesta del sistema a lazo abierto.

En la figura 2 se observa la entrada escalón en la señal de control, tanto positiva como negativa. La respuesta del sistema es naturalmente integrante, lo que significa que a lazo abierto la respuesta se continuaría creciendo indefinidamente. La sección en la curva donde la respuesta se estabiliza representa el intervalo donde la bola reposa sobre el otro extremo de la viga (ya que una pieza la detiene), por lo que para obtener la función de la planta se recorta la salida únicamente en el intervalo creciente.

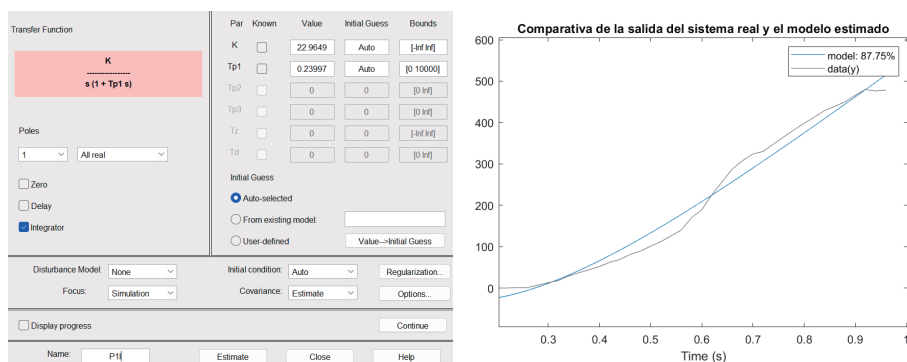


Fig. 3. Resultados System Identification.

De esta manera se logró establecer la función de transferencia del sistema de Bola y Viga con un 87.75% de similitud, la cual representa un sistema integrador de segundo orden. Estos sistemas

poseen un polo en el origen que ocasiona que la respuesta suba en rampa ante una entrada escalón, y un polo real negativo, lo que significa que el sistema no es oscilatorio.[6]

$$F(s) = \frac{22,9649}{s(1 + 0,23997s)} \quad (1)$$

C. Diseño del controlador.

El funcionamiento del sistema de control se resume en el diagrama mostrado en la figura 4. El control se basa en medir la distancia de la bola y compararla con la distancia de referencia (330 mm) para generar un error. Dicho error será analizado por el controlador PID para aumentar o disminuir el ancho de pulso alrededor de los 420 Hz (ancho de pulso en el motor que logra una posición horizontal de la viga).

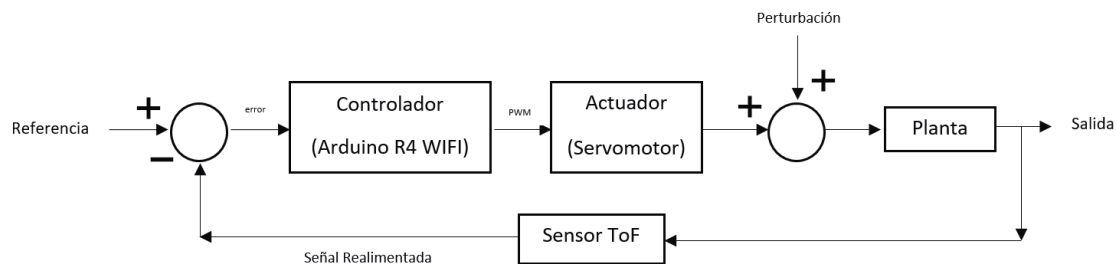


Fig. 4. Diagrama de control.

Un controlador PID está compuesto por 3 parámetros fundamentales que definirán su comportamiento. El término proporcional (K_p) aplica una corrección proporcional al error actual, de manera que a mayor error, mayor magnitud en la señal de control. No obstante, el término proporcional no es capaz de eliminar completamente el error por sí solo. Para ello se utiliza el término integral (K_i), el cual se encarga de acumular el error a lo largo del tiempo, de manera que se corrige gradualmente cualquier comportamiento que se desvíe de la tendencia, permitiendo eliminar errores en estado estacionario. Finalmente, el término derivativo (K_d) realiza un cálculo predictivo del futuro comportamiento del error mediante el análisis de la velocidad de cambio. Esto resulta útil a la hora de amortiguar las oscilaciones y mejorar la estabilidad del sistema. [7]

Para encontrar los parámetros del controlador PID se utilizó la herramienta de Matlab *PID Tunning*, la cual permite importar la función de transferencia de la planta y generar un controlador PID según los requerimientos de velocidad y robustez que se soliciten. La interfaz de la aplicación se observa en la figura 5a, donde es conveniente resaltar algunos aspectos. Primeramente, se puede observar cómo en la configuración se utiliza un controlador PID en paralelo, esto debido a que la librería utilizada para el código de arduino utiliza directamente los valores de K_P , K_i y K_d , lo que sugiere que utiliza esta configuración. Por otra parte, como requerimiento de diseño se solicitó una gran robustez en el sistema y una velocidad considerablemente lenta, para proteger los engranajes

internos del servomotor, ya que una respuesta más rápida y menos robusta implicaría ganancias más grandes y, por tanto, una señal de control más agresiva. Los resultados de las ganancias del PID, así como los parámetros de rendimiento se pueden observar en la figura 5b.

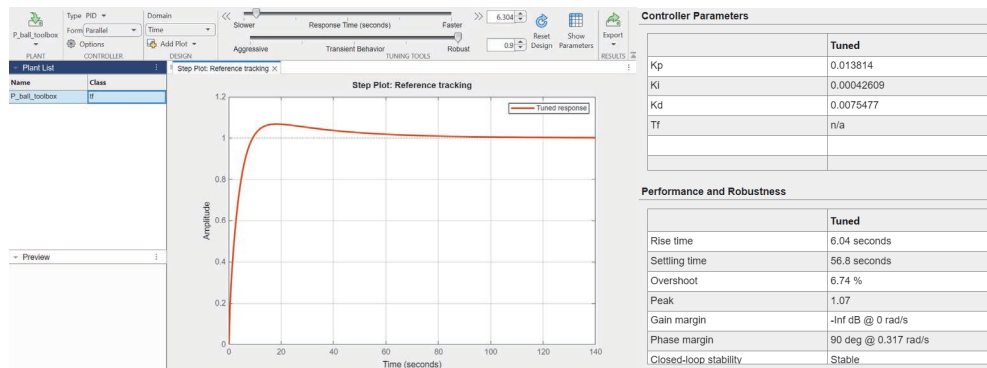


Fig. 5. Controlador PID diseñado con Matlab PID Tuning.

Para la implementación, se ejecutó un programa en la plataforma Arduino IDE que utiliza la librería *PID_VI.h* para realizar el control, además de las librerías *Wire.h* para la conexión STEMMA, *vl53l4cd class.h* para la lectura del sensor ToF y *Adafruit_PWMServoDriver.h* para generar la señal de control (modulación por ancho de pulso).

III. RESULTADOS

Una vez obtenida la función de transferencia de la planta con sus respectivos parámetros del controlador PID, se procedió a realizar las pruebas utilizando el código en Arduino, imprimiendo en el monitor serial la medida del sensor (ubicación de la 137 bola en mm), el ancho de pulso aplicado al servomotor (señal de control en Hz) y la referencia en 330 mm (centro de la viga). Dichos resultados fueron exportados con la herramienta CoolTerm y graficados en Matlab, tal y como se observa en la figura 6a.

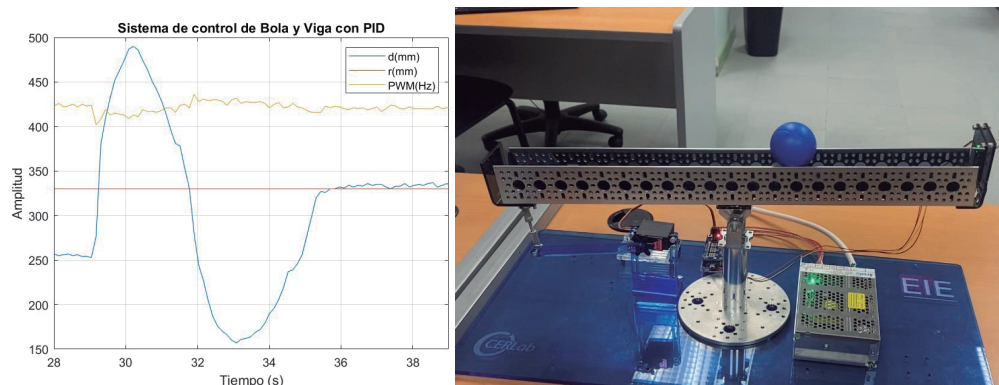


Fig. 6. Resultado del control PID.

Los resultados muestran cómo la distancia de la bola medida por el sensor alcanza la referencia de 330 mm en aproximadamente 7 segundos después de aplicar una perturbación. La señal de control vaía alrededor de los 420 Hz, puesto que ese valor representa el ancho de banda necesario para mantener la posición de la viga horizontal. Además, se observa una señal de control de muy poca amplitud, lo que resulta conveniente para proteger los engranajes del servomotor. En la figura 6b se puede observar el balón en el punto de referencia después de ser regulado por el controlador.

CONCLUSIONES

A través de la obtención de la función de transferencia (utilizando *Matlab System Identification*) y la implementación de un controlador PID (utilizando *Matlab PID Tuner*), se logró mantener la bola cerca de la posición de referencia con precisión aceptable y un tiempo de asentamiento de 7 segundos. El modelo obtenido análisis de Lagrange capturó mejor la interacción dinámica entre la bola y la viga en comparación con el modelo basado en la Segunda Ley de Newton, comprobando que un sistema integrador de segundo orden es adecuado para modelar el sistema. Dentro de las principales dificultades del proyecto, se destaca el diseño de la estructura del sistema para definir la altura y ubicación del servomotor, así como la longitud del brazo que provoca el torque sobre la viga. Por otra parte, lograr un deslizamiento adecuado de la bola sobre la viga es indispensable para lograr un control en el sistema, ya que un movimiento irregular ocasionaría distorsiones en la medición del sensor, y por tanto, una señal de control incorrecta. Se recomienda a futuros investigadores ser cuidadosos en la implementación del control y limitar los rangos de la modulación por ancho de pulso para restringir el movimiento del motor y así cuidar los engranajes. Por otra parte, el uso de varios sensores como bandas resistivas o sensores de giro resultaría útil para generar un error más preciso y por tanto, un control óptimo. Finalmente se recomienda implementar el sistema de control en un software con un lenguaje de programación que permita generar gráficas en tiempo real del comportamiento del sistema, como Python.

REFERENCIAS

- [1] A. Espeso, *Control PID de Barra y Bola con Arduino*. Estudio Roble, 2015.
- [2] AcromeINC, *Ball Beam Courseware*. AcromeINC, 2015.
- [3] P. V. M. Maalini, G. Prabhakar y S. Selvaperumal, ((Modelling and control of ball and beam system using PID controller,)) en *2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, Ramanathapuram, India: IEEE, 2016, ISBN: 978-1-4673-9545-8.
- [4] M. A. Rana, Z. Usman y Z. Shareef, ((Automatic Control of Ball and Beam System Using Particle Swarm Optimization,)) en *12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, IEEE, 2011.
- [5] M. Virseda, ((Modeling and Control of the Ball and Beam Process,)) ISRN LUTFD2/TFRT-5736-SE, Master's thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, mar. de 2004.

- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Pearson, 2010, vol. 5th ed.
- [7] K. J. Åström y T. Hägglund, *Advanced PID Control*. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems, y Automation Society, 2006.

Implementación de algoritmos de seguimiento de trayectorias para un robot manipulador y colaborativo

Implementation of trajectory tracking algorithms for a manipulator and collaborative robot

Monserrat Morales Salazar

*Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: monserrat.moralessalazar@ucr.ac.cr*

Ing. Leonardo José Marín Paniagua, PhD.

*Laboratorio de investigación en ingeniería de control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: leonardo.marin@ucr.ac.cr
ORCID 0000-0002-8986-642X*

Palabras clave:

Algoritmos de control, 6 grados de libertad, modelo cinemático, robot manipulador, trayectorias

RESUMEN

La investigación se basa en el control de un robot manipulador colaborativo de 6 grados de libertad. Se busca obtener expresiones que describan su comportamiento mediante los modelos cinemáticos directo e inverso. Dichas expresiones se obtuvieron con métodos presentados en el libro *Robotics Modelling, Planning and Control* [4]. Además, estas expresiones de cinemática inversa fueron validadas utilizando un curso del robot Kinova Gen 3 Lite.

Además, se realizaron programas en Matlab para que el robot fuera capaz de seguir trayectorias, en este caso se comprueban trayectorias circular, cuadrada y triangular. Para estos algoritmos se usó una herramienta de Matlab que realiza directamente la cinemática inversa del robot, posteriormente se van a comparar estos resultados con los resultados obtenidos mediante las expresiones propias.

Las trayectorias que el robot puede seguir dependen en gran medida de la capacidad que tienen sus articulaciones, por lo tanto, fueron probadas varias trayectorias mediante simulación para así tener en consideración los movimientos realizables y adecuados para el robot.

ABSTRACT:

The research is based on the control of a 6-degree-of-freedom collaborative robot manipulator. The goal is to obtain expressions that describe its behavior using forward and inverse kinematic models. These expressions were obtained using methods presented in the book *Robotics Modeling, Planning and Control*. Furthermore, these inverse kinematics expressions were validated using a Kinova Gen 3 Lite robot course.

In addition, Matlab programs were developed to enable the robot to follow trajectories; in this case, circular, square, and triangular trajectories were evaluated. For these algorithms, a Matlab tool was used

that directly performs the robot's inverse kinematics. These results will then be compared with the results obtained using the robot's own expressions.

The trajectories the robot can follow depend largely on the capabilities of its joints; therefore, several trajectories were assessed through simulation to determine the movements that are feasible and appropriate for the robot.

I. INTRODUCCIÓN

El modelado cinemático y control de trayectorias es esencial para validar el comportamiento del robot, asegurar movimientos precisos y planificar tareas dentro de su espacio de trabajo. Un buen control de trayectorias permite que el robot realice desplazamientos suaves y seguros, fundamentales en aplicaciones colaborativas.

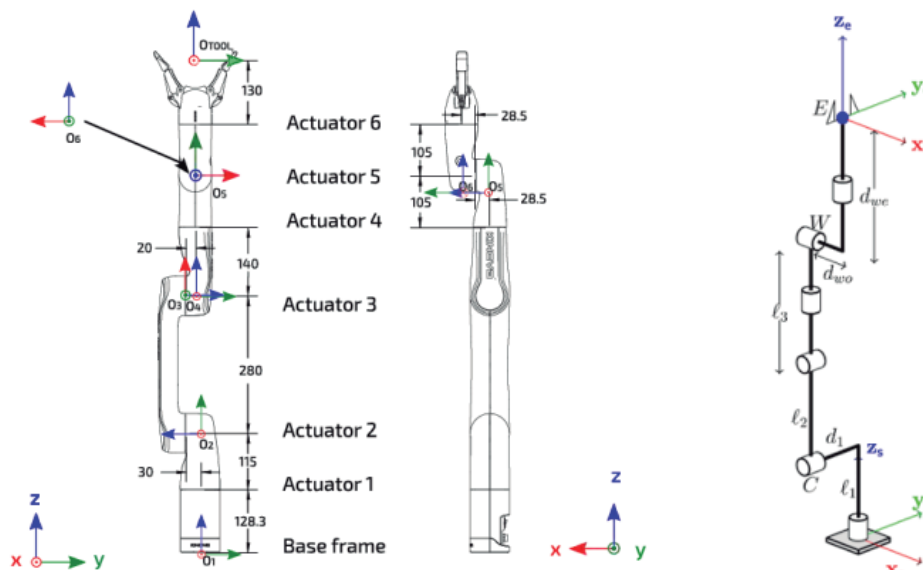
Para realizar el modelado cinemático se hace uso del libro *Robotics, Modelling, Planning and Control* [4] ya que brinda un método que incorpora las seis articulaciones del robot, pero dividiendo su análisis en tres articulaciones cada uno. Además, se comparan los resultados de modelado cinemático con un curso específicamente del Kinova Gen3 Lite.

II. METODOLOGÍA

A. Obtención del modelo cinemático directo

Para la obtención del modelo cinemático directo, primeramente se obtiene la tabla Denavit-Hartenberg.

Para dicha tabla, se utiliza la asignación de sistemas de referencia proporcionada por la guía de usuario para el robot Kinova de 6 grados de libertad (figura 1a).



(a) Asignación de sistemas de referencia según guía de usuario. [1]

(b) Modelo geométrico simplificado del robot. [2]

Fig. 1: Modelos del robot según guía de usuario.

En la siguiente tabla se muestra el CUADRO Denavit-Hartenberg realizada:

CUADRO I
PARÁMETROS D-H DEL ROBÓT GEN3 LITE

i	a_i (mm)	d_i (mm)	α_i (rad)	θ_i (rad)
1	0	243.25	$\pi/2$	θ_1
2	280	30	π	$\theta_2+\pi/2$
3	0	20	$\pi/2$	$\theta_3+\pi/2$
4	0	245	$\pi/2$	$\theta_4+\pi/2$
5	0	57	$\pi/2$	$\theta_5+\pi$
6	0	235	0	$\theta_6+\pi/2$

Para encontrar la cinemática directa en los parámetros D-H, se debe utilizar la matriz de transformación en la tabla 2. [3]

CUADRO II
MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i)\sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En la matriz anterior, se deben ingresar todas las filas de la tabla 1. Después, se deben multiplicar todas las matrices, esto corresponde a la cinemática directa:

$$T_{TOOL}^1 = A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 A_6^5 A_{TOOL}^6 \quad (1)$$

B. Obtención del modelo cinemático inverso

Para el modelo cinemático inverso, [4] presentó la solución al problema. El robot tiene una geometría en la que la propagación de los últimos 3 ejes cruza en un solo punto, entonces la posición en ese punto puede resolverse independientemente de las últimas 3 articulaciones. Es decir, el robot se divide en dos, las dos partes con 3 articulaciones cada una [4].

B.1. Primeras 3 articulaciones

Para este caso, se utilizó el modelo cinemático de un robot de 3 grados de libertad, pero, obtenido de forma geométrica. Esto se realizó utilizando el modelo geométrico simplificado del robot presentado en los laboratorios para el robot Kinova Gen3 (figura 1b).

Cabe destacar que se hicieron modificaciones en los ángulos ya que como se observa, no todos tienen el mismo eje de rotación y existe un desplazamiento de la base con respecto a la primera articulación.

B.2. Últimas 3 articulaciones

Al multiplicar las matrices $A_2^1 A_3^2 A_4^3$ para tomar únicamente las últimas articulaciones se tiene una matriz de rotación de Euler ZXZ. Las expresiones para este caso vienen dadas a partir de dividir las posiciones de una matriz de rotación 3×3 dada e igualando las mismas divisiones en la matriz de rotación ZXZ.

C. Algoritmo de seguimiento de trayectoria en Matlab

Para utilizar el modelo del robot en Matlab primero se importó el formato de descripción robótica unificada (archivo *urdf*), donde se describe la estructura del robot y sus propiedades:

```
gen3Lite = importrobot("GEN3-LITEef.urdf","MeshPath","/gen3_lite/meshes");
```

Después se definieron dos trayectorias, una circular y una cuadrada, ambas con dimensiones de 0.1 m y un punto de llegada en específico. Ejemplo para trayectoria circular:

```
% definir waypoints para trayectorias circulares
center = [0.45 -0.06 0.31]; %[x y z]
radius = 0.1;

dt = 0.25;
t = (0:dt:10)';
theta = t*(2*pi/t(end))-(pi/2);
points = center + radius*[0*ones(size(theta)) cos(theta) sin(theta)];
```

Después, se utilizó la herramienta de *Matlab Inverse Kinematics* ya que proporciona una solución de cinemática inversa para que el robot llegue al punto especificado:

```
ik = inverseKinematics('RigidBodyTree',gen3Lite);
```

Lo que resta en el código es el cálculo para las velocidades y aceleraciones en las articulaciones, además de la conexión de Matlab con el robot.

III. RESULTADOS

A. Cinemática directa

Al hacer la multiplicación presentada en la ecuación 1, se obtuvo una matriz 4×4 :

CUADRO III
MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN

$$T_{\text{TOOL}}^1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En la siguiente parte se definen todas las posiciones de la matriz :

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\cos(\theta_6)\sigma_4 - \sin(\theta_6)\sigma_2 \\
 a_{12} &= \sin(\theta_6)\sigma_4 - \cos(\theta_6)\sigma_2 \\
 a_{13} &= \sin(\theta_5)\sigma_8 - \cos(\theta_5)\sigma_9 \\
 a_{14} &= 10\sin(\theta_1) - 280\cos(\theta_1)\sin(\theta_2) + 235[\sin(\theta_5) + \cos(\theta_5)\sigma_9] + 57[\cos(\theta_4)\sigma_{13} \\
 &\quad - \sin(\theta_1)\sin(\theta_4)] + 245\cos(\theta_1)[\cos(\theta_2))\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3))\sin(\theta_2)] \\
 a_{21} &= \cos(\theta_6)\sigma_5 - \sin(\theta_6)\sigma_1 \\
 a_{22} &= \cos(\theta_6)\sigma_1 - \sin(\theta_6)\sigma_5 \\
 a_{23} &= \cos(\theta_5)\sigma_7 - \sin(\theta_5)\sigma_6 \\
 a_{24} &= 57[\cos(\theta_1)\sin(\theta_4) + \cos(\theta_4)\sigma_{12}] - 10\cos(\theta_1) - 280\sin(\theta_1)\sin(\theta_2) \\
 &\quad + 235[\cos(\theta_5)\sigma_7 - \sin(\theta_5)\sigma_6] \\
 &\quad + 245\sin(\theta_1)[\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)] \\
 a_{31} &= \sin(\theta_6)\sigma_3 - \cos(\theta_4)\cos(\theta_6)\sigma_{10} \\
 a_{32} &= \cos(\theta_6)\sigma_3 - \cos(\theta_4)\sin(\theta_6)\sigma_{10} \\
 a_{33} &= \cos(\theta_5)\sigma_{11} - \sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\sigma_{10} \\
 a_{34} &= 280\cos(\theta_2) + 245[\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) + \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)] - 57\cos(\theta_4)\sigma_{10} \\
 &\quad + 235[\cos(\theta_5)\sigma_{11} - \sin(\theta_4)\sin(\theta_5)\sigma_{10}] + \frac{973}{4}
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \cos(\theta_5)\sigma_6 + \sin(\theta_5)\sigma_7 \\
 \sigma_2 &= \cos(\theta_5)\sigma_8 - \sin(\theta_5)\sigma_9 \\
 \sigma_3 &= \sin(\theta_5)\sigma_{11} + \cos(\theta_5)\sin(\theta_4)\sigma_{10} \\
 \sigma_4 &= \sin(\theta_1)\sin(\theta_4) - \cos(\theta_4)\sigma_{13} \\
 \sigma_5 &= \cos(\theta_1)\sin(\theta_4) + \cos(\theta_4)\sigma_{12} \\
 \sigma_6 &= \cos(\theta_1)\cos(\theta_4) - \sin(\theta_4)\sigma_{12} \\
 \sigma_7 &= \sin(\theta_1)[\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)] \\
 \sigma_8 &= \cos(\theta_4)\sin(\theta_1) + \sin(\theta_4)\sigma_{13} \\
 \sigma_9 &= \cos(\theta_1)[\cos(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)] \\
 \sigma_{10} &= \cos(\theta_2)\sin(\theta_3) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2) \\
 \sigma_{11} &= \cos(\theta_2)\cos(\theta_3) + \sin(\theta_2)\sin(\theta_3) \\
 \sigma_{12} &= \sin(\theta_1)[\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)] \\
 \sigma_{13} &= \cos(\theta_1)[\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + \cos(\theta_2)\cos(\theta_3)]
 \end{aligned}$$

B. Cinemática inversa

B.1. Primeras 3 articulaciones

Dada una posición deseada , las expresiones para las primeras 3 articulaciones , y son las siguientes:

$$\theta_1 = \operatorname{atan2}\left(\frac{p_y}{p_x}\right) + \operatorname{asin}\left(\frac{d_1}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}\right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \alpha + \beta - 90 \quad (3)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\pm\sqrt{1-D^2}, D) \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{P_z - l_1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 - d_1^2}}\right) \quad (5)$$

$$\beta = \text{atan2}(l_3 \sin(\theta_3), l_2 + l_3 \cos(\theta_3)) \quad (6)$$

$$D = \frac{d - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \quad (7)$$

$$d = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + (P_z - l_1)^2 - d_1^2} \quad (8)$$

B.2. Últimas 3 articulaciones

Teniendo una matriz de rotación R 3×3 establecida como la siguiente:

CUADRO IV
MATRIZ DE LA TRANSFORMACIÓN

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Las expresiones para estas articulaciones son las siguientes:

$$\theta_4 = \text{atan2}(-r_{13}, r_{23}) \quad (9)$$

$$\theta_5 = \text{atan2}\left(-\sqrt{r_{13}^2 + r_{23}^2}, r_{33}\right) \quad (10)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(-r_{31}, -r_{32}) \quad (11)$$

Cabe destacar que hay más de una solución para las posiciones de las articulaciones, es decir, algunos signos pueden cambiar.

C. Seguimiento de trayectorias

En las siguientes imágenes se muestran las trayectorias seguidas por el robot. En este caso se realizaron tres, una trayectoria circular, una cuadrada y una triangular.

Cabe destacar que el círculo es diámetro 0.1 m y el cuadrado y triángulo tiene sus lados de la misma medida para que el robot fuera capaz de completar las trayectorias con éxito.

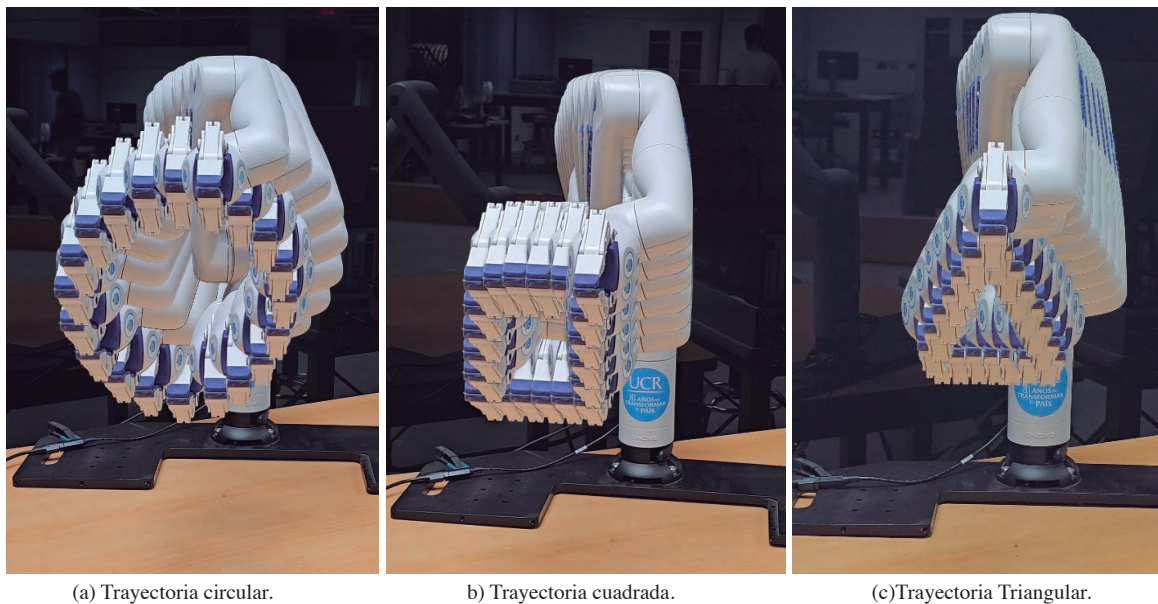


Fig. 2. Robot Kinova Gen 3 realizando el seguimiento de trayectorias.

CONCLUSIONES

Las expresiones propias obtenidas para la cinemática inversa fueron comparadas con los resultados del curso para el robot Kinova, por lo tanto, se consideran buenos resultados. Sin embargo, queda para un trabajo futuro la comprobación de dicha solución en el robot y comparar los resultados con la respectiva plataforma.

Además, cabe destacar que las expresiones encontradas pueden cambiar sus signos de acuerdo con las diferentes posiciones que puede tener el robot para alcanzar el punto especificado. Por lo tanto, de acuerdo con la trayectoria a realizar, es posible que con las soluciones propuestas no se concrete del todo, pero, cambiando signos en las expresiones se puede ser realizable.

Es de gran importancia hacer estudio de las capacidades que tiene el robot de acuerdo con los movimientos de las articulaciones. Esto con el fin de proponer trayectorias que sean realizables para el robot, de lo contrario, simplemente no las realiza del todo.

Respecto al algoritmo de seguimiento de trayectorias implementado, se basa en la secuencia directa de puntos definidos en la trayectoria. En cada instante, se calcula la cinemática inversa para la posición puntual deseada y se envían los valores articulares correspondientes al robot para su ejecución. Este método simple permite seguir la trayectoria definida con precisión en los puntos especificados, aunque puede presentar saltos o movimientos bruscos si la trayectoria es si los puntos están muy alejados o se presenta una singularidad en el robot.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, como parte de la ejecución del proyecto número 322-C5-011.

REFERENCIAS

- [1] Kinova inc. (HQ), “*Kinova Gen3 lite robot: User Guide*”, págs. 132-137, 2021.
- [2] Kinova en colaboración con la Universidad Polytechnique Montreal, “*Gen3lite Curriculum*”, 2021. Dirección: <https://artifactory.kinovaapps.com/ui/native/generic-documentation-public/Documentation/Gen3%20lite/Curriculum/Undergraduate%20level/Collaboration%20with%20Polytechnique%20Montreal.zip>
- [3] L. Marín y F. Ruiz, “*Curso Introducción a la Robótica Movil e Industrial*”. Escuela de Ingeniería Eléctrica, 2024.
- [4] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, “*Robotics Modelling, Planning and Control*”. Springer, 2009.

Control de tracción basado en estimación de fuerza normal para robots móviles sobre ruedas

Normal force estimation based traction control for wheeled mobile robots

Arnoldo Castro

Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR

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

Orlando Arrieta

Profesor, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

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

Denis Abarca

Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR

e-mail: denis.abarca@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Control, tracción, vehículo, robots móviles.

Keywords:

Control, traction, vehicle, mobile robots.

RESUMEN

La estabilidad de un robot móvil sobre ruedas puede verse limitada por condiciones no ideales de la superficie de ruedo. Perturbaciones externas originadas por la presencia de baches o montículos, obstáculos o secciones de baja tracción generan fuerzas que socavan la robustez de esta clase de máquinas. Este tipo de fenómenos suelen ser altamente localizados y difíciles de predecir. Se presenta la simulación de una rueda de un robot sobre ruedas que utiliza una estimación de la fuerza normal basada en medición de radio de curvatura de la superficie para predecir y evitar situaciones de baja tracción y pérdida de contacto. Se demuestra que esta estimación es útil para reducir el deslizamiento máximo del vehículo y reducir la probabilidad de pérdida de contacto entre las ruedas y el suelo.

ABSTRACT

The stability of wheeled mobile robots can be limited by non-ideal conditions of the road surface. External disturbances caused by the presence of potholes or mounds, obstacles, or sections with low traction generate forces that undermine the robustness of this class of machines. Such phenomena are typically highly localized and difficult to predict. This work presents the simulation of a wheel from a wheeled robot that uses an estimation of the normal force—based on measuring the radius of curvature of the surface—to predict

and avoid low-traction and contact-loss situations. It is shown that this estimation is useful for reducing the vehicle's maximum slip and lowering the probability of losing contact between the wheels and the ground.

I. INTRODUCCIÓN

La acelerada adopción del uso de bases robóticas móviles en la industria viene acompañada por una necesidad de hacerlas seguras y estables [1]. En años recientes esta adopción se ha incrementado notablemente para aplicaciones de localización y transporte de unidades a lo interno de plantas de producción donde se manejan cargas considerables. [2]

En años recientes, el problema de control de tracción y estabilidad lateral ha cobrado mucha importancia en el campo de la robótica debido al auge del uso de plataformas robóticas para asistencia y transporte en líneas de producción industrial así como la cada vez más frecuente presencia de robots autónomos para servicios de entrega en ciudades desarrolladas. En este ámbito, el enfoque que se ha dirigido hacia el seguimiento de trayectorias mediante un enfoque de diseño de sistemas de control [3]-[11]. El efecto de las superficies resbalosas (de baja tracción) o no planas (superficies irregulares con baches, montículos u ostáculos) no ha sido desarrollado al mismo nivel de profundidad. En la mayoría de los casos, la topología de la superficie de ruedo se trata como una perturbación desconocida [6], [8]-[10], [12]. Cuando se considera la presencia de una superficie de ruedo no plana, es inusual incluir escenarios que llevan al fallo de la plataforma como vuelcos o deslizamientos de gran magnitud [5], [9], [10], [13] .

En las siguientes secciones se desarrolla un modelo rígido de cuarto de vehículo (quarter-car) y un controlador de velocidad con ajustes en valor deseado basados en la estimación de la curvatura de la superficie de ruedo. Se demuestra que este esquema permite reducir la velocidad de forma automática lo suficiente para reducir pérdidas de tracción y mantener el contacto rueda-suelo.

II. METODOLOGÍA

Se desarrollo un modelo de cuarto de vehículo basado en la suposición de rueda rígida y sin suspensión. Se desarrolló un esquema de estimación de fuerza Normal basado en la curvatura de la superficie para evitar la perdida de contacto y tracción en superficies irregulares. Se simuló el robot en superficies irregulares para verificar la utilidad del esquema propuesto.

III. MODELO DINÁMICO

Al trabajar un modelo de cuerpo rígido sin suspensión, se reduce la capacidad del vehículo para trasladarse sobre superficies irregulares sin ver reducida la fuerza normal entre la rueda y el suelo y con ello la fuerza de tracción disponible. Por lo tanto, este planteamiento representa un caso de mayor dificultad. En la Figura 1 se muestra un diagrama de cuerpo libre de la rueda de una plataforma móvil. A continuación se desarrollan las ecuaciones de movimiento mediante un enfoque newtoniano. Primeramente, se plantea segunda Ley de Newton en las direcciones x y z :

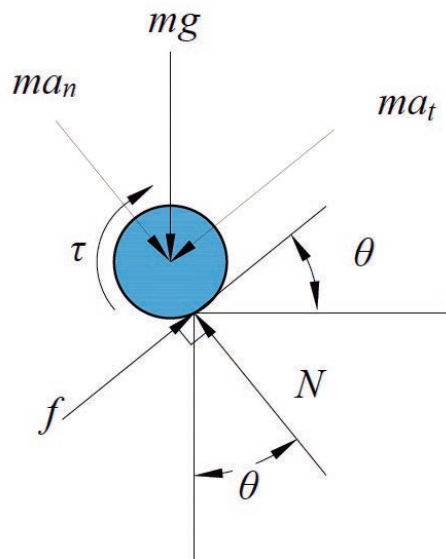


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre.

$$m\ddot{x} = f\cos\theta - N\sin\theta \quad (1)$$

$$m\ddot{z} = -mg + N\cos\theta + f\sin\theta \quad (2)$$

donde m es la masa combinada del cuarto de vehículo y la rueda, g la aceleración de la gravedad, θ la pendiente de la superficie de ruedo, f la fuerza de tracción, y $\ddot{x}$ y $\ddot{z}$ las aceleraciones en las direcciones x y z respectivamente.

Como el perfil de la superficie se puede definir como una función $z = h(x)$, se puede relacionar la aceleración en z con la aceleración en x utilizando la regla de la cadena de forma que:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt} \right) = \frac{d}{dt} (z' \dot{x}) = \frac{d}{dt} (z') \dot{x} + z' \frac{d}{dt} \dot{x} = z'' \dot{x}^2 + z' \ddot{x} \quad (3)$$

Despejando N de (1) y sustituyendo N y (3) en (2), simplificando y reorganizando términos se obtiene

$$(m\cos\theta + mz'\sin\theta)\ddot{x} = -mg\sin\theta + f - mz''\dot{x}^2\sin\theta \quad (4)$$

Similarmente, para la dinámica rotacional de la rueda se puede aplicar la siguiente relación:

$$\frac{\sum M_o}{\tau - fr} = I\dot{\omega} \quad (5)$$

Donde τ es el par externo aplicado sobre la rueda, r su radio, I su momento de inercia y ω su aceleración angular.

A. Fuerzas de tracción

En la literatura se pueden encontrar diferentes modelos de fuerza de fricción. Sin embargo, el más utilizado es el llamado Magic Formula, o modelo de Pacejka [14]. En este modelo, el coeficiente de fricción depende del deslizamiento. Se han ajustado diferentes curvas para las diversas interacciones entre la superficie y el neumático, siendo específicas para cada una de ellas. Según Pacejka, el coeficiente de fricción se puede describir mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$C = 1 + \left[1 - \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \left(\frac{y_a}{D} \right) \right) \right] \quad (6)$$

$$\mu = D \sin \left[C \arctan \left(Bs - E \left(Bs - \arctan(Bs) \right) \right) \right] \quad (7)$$

$$E = \frac{\left[Bx_m - \tan \left(\frac{\pi}{2C} \right) \right]}{Bx_m - \arctan(Bx_m)} \quad (8)$$

donde D es el coeficiente máximo de fricción, x_m es el deslizamiento en el que se alcanza el coeficiente de fricción máximo, B es la pendiente de la curva en el origen y y_a es el coeficiente de fricción para valores altos del coeficiente de deslizamiento s . Este coeficiente de deslizamiento corresponde a la razón entre la velocidad del punto de contacto de la rueda con el suelo con la velocidad de su eje:

$$s = \frac{\omega r - v}{v} \quad (9)$$

Para este estudio se utilizaron los siguientes parámetros: $D = 0,92$, $y_a = 0,4$, $x_m = 0,2$ y $B = 6,44$. La fuerza de tracción f que actúa sobre la rueda se encuentra por medio de:

$$f = \mu(s) \quad (10)$$

B. Sistema de control

Para efectos de este estudio se incorporó a la rueda un control de velocidad proporcional que se describe mediante la siguiente relación:

$$\tau = K_p (v_{ref} - v) \quad (11)$$

donde K_p es la ganancia proporcional, v la velocidad del vehículo y v_{ref} el valor comandado de velocidad.

B.1. Control de tracción

Una de las principales causas de pérdida de tracción es la reducción en la fuerza normal entre las ruedas y el suelo. Esta reducción puede ocurrir en pendientes pronunciadas o al pasar sobre protuberancias en la superficie de ruedo. Si estas protuberancias son muy pronunciadas y son atravesadas a una velocidad suficientemente alta, la fuerza normal puede reducirse al punto de que el robot puede perder contacto con el suelo.

La fuerza normal N se puede obtener mediante la aplicación de la segunda ley de Newton en la dirección normal a la superficie de ruedo de la siguiente forma:

$$N = mg \cos \theta - m \frac{v^2}{\rho} \quad (12)$$

donde ρ es el radio de curvatura de la superficie y v su velocidad tangente a la superficie. Dado que un objetivo durante la operación del robot móvil es mantener contacto firme con la superficie de ruedo, se busca que la fuerza normal N sea siempre mayor que cero. Es decir

$$\begin{aligned} N &\geq 0 \\ mg \cos \theta - m \frac{v^2}{\rho} &\geq 0 \\ v &\leq \sqrt{\rho g \cos \theta} \end{aligned} \quad (13)$$

Por lo tanto, existe un valor máximo de velocidad para el cual el sistema mantendrá contacto con el suelo y tracción adecuada. En la relación (13) se muestra que esta velocidad depende del radio de curvatura de la superficie. Por lo tanto, se propone que es posible evitar la pérdida de tracción anticipando radios de curvatura alguna distancia adelante del robot y limitando la velocidad acorde a ello. En este estudio esta distancia se conocerá como *offset*.

Por lo tanto, el valor comandado de velocidad se sobrescribe si este supera la velocidad máxima permitida de forma que:

$$v_{ref_lim} = \begin{cases} v_{ref} & \text{si } v_{ref} \leq v_{max} \\ \gamma v_{ref} & \text{si } v_{ref} > v_{max} \end{cases} \quad (14)$$

donde v_{max} se encuentra mediante (13) y γ es un margen de seguridad.

Para efectos de este estudio se asume que la curvatura se puede estimar mediante la combinación de sensores de aceleración y de inclinación.

IV. RESULTADOS

Se simuló un modelo de cuarto de vehículo atravesando una superficie periódica descrita mediante la siguiente función de altura.

$$h(x) = H \sin^2\left(\frac{\pi x}{2L}\right) \quad (15)$$

donde H es la altura máxima del perfil de superficie, y $2L$ es la longitud del montículo que representa. Se estableció una velocidad comandada de 3 m/s para un montículo de $H = 0,5$ m de altura y una longitud L de 2 m. Se simularon cuatro implementaciones del algoritmo de control: control proporcional sin límite de velocidad, límite de velocidad estimado anticipando la curvatura a distancia igual al radio de la rueda adelante del robot (Offset = r), igual a 2.5 veces el radio (Offset = $2.5r$) y estimación con un factor de seguridad de 50 % con un offset de $2.5r$. El robot se simuló con una masa de 15 kg, un radio de rueda de 0.15 m y un momento de inercia para las ruedas de $0.131 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

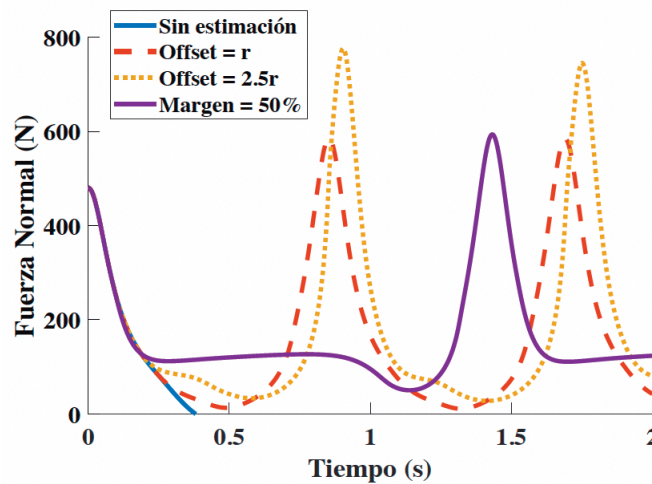


Fig. 2. Fuerza normal.

La figura 2 muestra la fuerza normal entre la rueda y la superficie para cada uno de los casos descritos. Como se observa, el control sin estimación de curvatura no limita la velocidad de acuerdo con la curvatura de la superficie que atraviesa la rueda. Por lo tanto, la fuerza normal se reduce drásticamente a cero de manera abrupta. Al alcanzar cero la fuerza normal, la simulación se detiene. Al anticipar la curvatura una distancia igual al radio de la rueda por delante del robot, éste fue capaz de reducir su velocidad lo suficiente para evitar perder contacto con el suelo. Si el offset de estimación se aumenta a 2.5 veces el radio de la rueda, la fuerza normal disminuye de forma más gradual, pero aún así se reduce considerablemente, casi al mismo nivel que para el offset de un radio. Si se aplica un margen de 50 % al límite de velocidad máximo, de forma

que la velocidad comandada al vehículo es un 50 % de la velocidad máxima teórica permitida, es posible mantener la fuerza normal en niveles más altos, lo cual proporciona una mayor tracción disponible.

En la figura 3 presenta la razón de deslizamiento para cada uno de los casos simulados. En el caso sin estimación de curvatura el deslizamiento aumenta de más rápidamente. El caso con más distancia de anticipación en la estimación de la curvatura mostró el mayor aumento en la razón de deslizamiento y más derrape del vehículo. Cuando se aplicó un factor del 50 % a la velocidad máxima permitida el deslizamiento se permaneció menor a 1 aunque no se redujo considerablemente en comparación a las diferencias observadas en la reducción de la fuerza normal. Esto sugiere que hay una interrelación compleja entre las variables involucradas por lo que la optimización de este esquema de control requiere de una exploración más detallada.

La figura 4 muestra la velocidad del robot. La reducción de velocidad hacia la velocidad límite estimada es más pronunciada conforme mayor es el offset aplicado a la estimación de la curvatura. Sin embargo, para un offset de $2.5r$ la velocidad alcanzó valores más altos. Aún así, la velocidad promedio correspondiente a la curva roja fue 2.704 m/s, mientras que para la línea punteada fue de 2.6 m/s, por lo que no se distingue una ventaja a la mayor velocidad máxima. Cuando se aplica un margen de 50 % a la velocidad máxima se obtuvo mejores resultados en cuanto a fuerza normal, sin embargo lo logra viajando a velocidades considerablemente bajas.

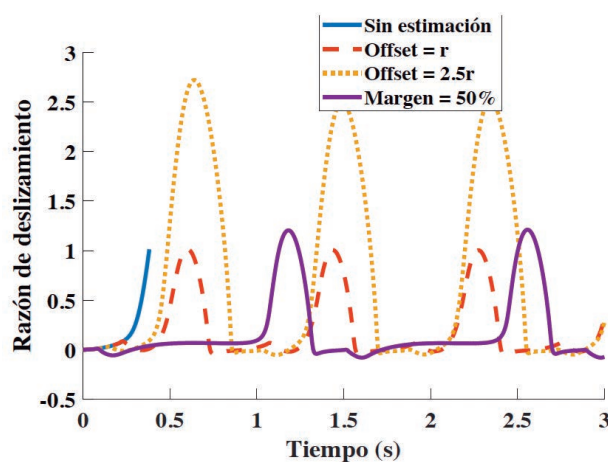


Fig. 3. Razón de deslizamiento.

la curva roja fue 2.704 m/s, mientras que para la línea punteada fue de 2.6 m/s, por lo que no se distingue una ventaja a la mayor velocidad máxima. Cuando se aplica un margen de 50 % a la velocidad máxima se obtuvo mejores resultados en cuanto a fuerza normal, sin embargo lo logra viajando a velocidades considerablemente bajas.

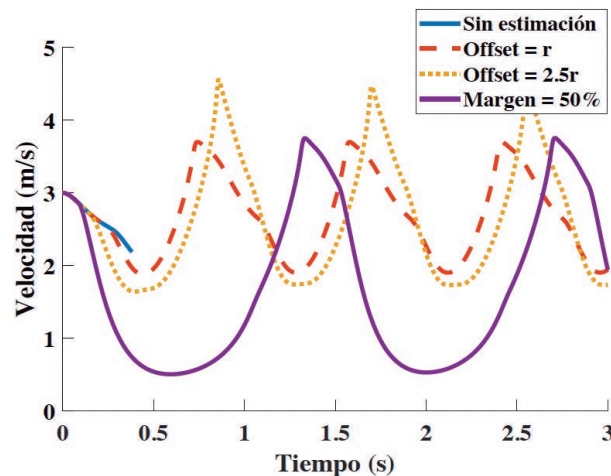


Fig. 4. Velocidad.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados indican que el control de tracción basado en limitar la velocidad máxima con base en la curvatura de la superficie de rueda es efectivo evitar la pérdida de contacto entre la rueda y el suelo. Además, dicho esquema permite que el vehículo transite sobre una superficie irregular sin que ocurra deslizamiento ilimitado. Sin embargo, la efectividad de esta estrategia depende considerablemente del control de velocidad sobre el que opera.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Haney y C.-J. Liang, «A literature review on safety perception and trust during human–robot interaction with autonomous mobile robots that apply to industrial environments,» *IIEE transactions on occupational ergonomics and human factors*, vol. 12, n.º 1-2, págs. 6-27, 2024.
- [2] R. Bogue, «Robots that interact with humans: a review of safety technologies and standards,» *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 44, n.º 4, págs. 395-400, 2017.
- [3] E. Savaee, A. Rahmani Hanzaki e Y. Anabestani, «Kinematic Analysis and Odometry-Based Navigation of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot on Uneven Surfaces,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 108, n.º 2, pág. 13, 2023.
- [4] B. Zhang, G. Li, Q. Zheng, X. Bai, Y. Ding y A. Khan, «Path planning for wheeled mobile robot in partially known uneven terrain,» *Sensors*, vol. 22, n.º 14, pág. 5217, 2022.
- [5] H. Jangid, S. Jain, B. Teka, R. Raja y A. Dutta, «Kinematics-based end-effector path control of a mobile manipulator system on an uneven terrain using a two-stage Support Vector Machine,» *Robotica*, vol. 38, n.º 8, págs. 1415-1433, 2020.
- [6] N. Pico, H.-r. Jung, J. Medrano et al., «Climbing control of autonomous mobile robot with estimation of wheel slip and wheel-ground contact angle,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 36, n.º 2, págs. 959-968, 2022.
- [7] F. Liu, X. Li, S. Yuan y W. Lan, «Slip-aware motion estimation for off-road mobile robots via multi-innovation unscented Kalman filter,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 43 482-43 496, 2020.

- [8] T. Burghi, J. Iossaqui y J. Camino, «A general update rule for Lyapunov-based adaptive control of mobile robots with wheel slip,» *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 38, n.º 4, págs. 1172-1198, 2024.
- [9] M. Habibnejad Korayem, N. Ghobadi y S. Fathollahi Dehkordi, «Designing an optimal control strategy for a mobile manipulator and its application by considering the effect of uncertainties and wheel slipping,» *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 42, n.º 5, págs. 1487-1511, 2021.
- [10] N. H. Hadi y K. K. Younus, «Path tracking and backstepping control for a wheeled mobile robot (WMR) in a slipping environment,» en *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 671, 2020, pág. 012 005.
- [11] M. Korayem, M. Safarbali y N. Y. Lademakhi, «Adaptive Robust Control with Slipping Parameters Estimation Based on Intelligent Learning for Wheeled Mobile Robot,» *ISA transactions*, 2024.
- [12] Q. Lu, D. Zhang, W. Ye, J. Fan, S. Liu y C.-Y. Su, «Targeting posture control with dynamic obstacle avoidance of constrained uncertain wheeled mobile robots including unknown skidding and slipping,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 51, n.º 11, págs. 6650-6659, 2020.
- [13] S.-Y. Jeon, R. Chung y D. Lee, «Planned Trajectory Classification for Wheeled Mobile Robots to Prevent Rollover and Slip,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023.

Sintonización analítica de controladores PID más filtro para plantas de segundo orden

PID plus filter analytic tuning for second order plants

José David Rojas Fernández
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
e-mail: jose.rojas.f@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-1176-9061>

Orlando Arrieta Orozco
Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR
e-mail: orlando.arrieta@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0002-4004-8573>

Ramon Vilanova Arbós
Departament de Telecomunicació i Enginyeria de Sistemes,
Universitat Autònoma de Barcelona
e-mail: ramon.vilanova@uab.cat
<https://orcid.org/0000-0002-8035-5199>

Palabras clave:

Control, filtro, PID, segundo orden, sintonización analítica.

Keywords:

Analytical tuning , control, filter, PID, second order.

RESUMEN

Este trabajo presenta una sintonización analítica para controladores proporcional integral derivativos (PID) con la adición de un filtro para la referencia, para plantas de segundo orden sobreamortiguadas, de manera que su comportamiento de lazo cerrado se aproxime a una respuesta también de segundo orden. La regla de control cumple su cometido, además de que logra márgenes de fase muy buenos. Se hace un estudio del efecto de la selección de los parámetros de sintonización y se indican guías para trabajos futuros.

ABSTRACT

This paper presents an analytical tuning method for proportional-integral-derivative (PID) controllers with the addition of a reference filter for overdamped second-order plants, so that their closed-loop behavior approximates a second-order response. The control rule fulfills its purpose and achieves very good phase margins. A study of the effect of the tuning parameter selection is conducted, and guidelines for future work are provided.

I. INTRODUCCIÓN

El controlador proporcional integral derivativo (PID) continúa siendo el algo ritmo de control de más impacto a nivel mundial, incluso por encima de técnicas más complejas y, en teoría, superiores [1]. Y a pesar de que existen múltiples reglas de sintonización, todavía existe lugar para la investigación aún en temas que inicialmente se creían superadas [2].

Dentro del ámbito de control, es muy común que la sintonización de controladores PID dependa de métodos de optimización, ya sean métodos deterministas relacionados con el cálculo del gradiente de una función de costo [3] o utilizando técnicas aleatorias bioinspiradas [4].

Sin embargo, también es posible encontrar sintonizaciones que se basen en un estudio analítico del problema, en lugar de convertirlo en un problema numérico. Este precisamente es el objetivo de este trabajo, específicamente para plantas de segundo orden sobreamortiguadas.

Ya existen metodologías para este tipo de plantas para controladores PID, por ejemplo, en Shen y Chiang [5], se presenta una sintonización para plantas de segundo orden que minimiza la integral del valor absoluto del error, con restricciones en la robustez y el ancho de banda. No obstante, la sintonización del controlador es sumamente compleja y requiere la aplicación de una función de 11 parámetros.

Otros autores como Hu et al. [6] han tratado con el problema de sintonizar controladores para plantas de segundo orden sobreamortiguadas con tiempo muerto. Sin embargo, en estos casos la solución numérica suele ser la elección más escogida, debido a que el tiempo muerto no permite una solución analítica exacta, debido a la aparición de un número infinito de polos en lazo cerrado.

Por estas razones, en este trabajo se presenta una sintonización sencilla y obtenida de una manera analítica para plantas de segundo orden. Sin embargo, al contrario de los trabajos referenciados anteriormente, para obtener una respuesta semejante a un segundo orden en lazo cerrado, se propone la utilización de un filtro para la señal de referencia que permite mitigar el efecto de los ceros de lazo cerrado indeseados que provoca el control PID realimentado. En la sección 3 se presenta los fundamentos teóricos mínimos necesarios para el desarrollo de la regla de control, mientras que la derivación de la regla de sintonía se presenta en la sección 4. En la sección 5 se hace el análisis de la regla de sintonización con una planta modelo para verificar el efecto de los parámetros de sintonización sobre la respuesta.

II. METODOLOGÍA

En la industria es común que se controlen máquinas y procesos mediante una realimentación, dado que esto permite incorporar información en tiempo real al algoritmo de control, de manera que se realicen las correcciones necesarias para cumplir con los criterios de desempeño.

En la Figura 1 se muestra un lazo de control realimentado con un filtro de la señal de referencia. El bloque P corresponde a la “planta” y representa el modelo matemático del proceso o máquina que se desea controlar. El bloque C es lo que se conoce como el controlador, y matemáticamente corresponde a una expresión matemática que define el algoritmo de control. En su forma más sencilla, el controlador toma la señal de error e y calcula la señal de control u que luego es alimentada

a la planta. El error se calcula como $e = r - y$, donde r es la señal de referencia y y es la salida de la planta. La referencia es la señal que representa el valor deseado de la salida de la planta. Idealmente $r(t) = y(t)$ para todo instante de tiempo t , pero en general conseguir esto es imposible. Por ello, se debe calcular un controlador C que logre reducir en la medida de lo posible el error.

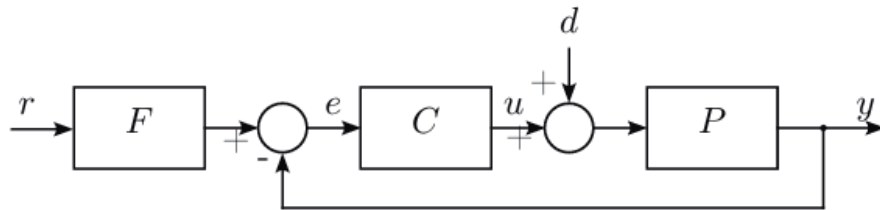


Fig. 1. Sistema de control realimentado con un filtro en la referencia.

La señal d se le conoce como perturbación y es una manera de representar todo efecto externo a la planta que puede hacer que el error se desvíe de cero. En la medida de lo posible, el controlador C debería ser capaz de seguir a la referencia r al mismo tiempo que rechaza las perturbaciones d . Sin embargo, en general no es posible que el controlador sea capaz de cumplir con estas dos funciones, por lo que se puede agregar un filtro a r , para lograr cambiar la dinámica de la respuesta al seguimiento de referencia. Este filtro está representado con el bloque F .

En este artículo, se trata el caso de una planta de segundo orden sobreamortiguada, que vendría dada por la función de transferencia:

$$P(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (1)$$

donde K es la ganancia en estado estacionario, τ_1 y τ_2 son las constantes de tiempo de los polos. Solo se considerará el caso en que $\tau_1 > 0$ y $\tau_2 > 0$. Para trabajos posteriores se tratará el caso de plantas subamortiguadas.

El controlador proporcional-integral-derivativo (PID) en su forma ideal viene dado por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

donde $u(t)$ es la señal de control. K_p , K_i y K_d son la ganancia proporcional, integral y derivativa respectivamente, y corresponde a los parámetros de sintonización del controlador.

Una sintonización corresponde a definir los valores de las ganancias del controlador de manera que se cumpla con algún criterio en específico. En este artículo se presenta una sintonización

analítica que busca encontrar unas ganancias de manera que se defina el comportamiento de lazo cerrado de manera única.

La respuesta en lazo cerrado se puede calcular como:

$$y(s) = \frac{F(s)C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} r(s) + \frac{P(s)}{1 + C(s)P(s)} d(s), \quad (3)$$

si se toma el controlador ideal en su forma en frecuencia:

$$C(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}, \quad (4)$$

y si se omite por ahora el filtro F , se llega a que:

$$y(s) = \frac{K(K_d s^2 + K_p s + K_i)r(s) + K s d(s)}{s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) + K(K_d s^2 + K_p s + K_i)} \quad (5)$$

Queda claro que, con un controlador PID, la respuesta en lazo cerrado resultante es de tercer orden, pero con dos ceros para la respuesta ante cambios en $r(s)$ y con un cero en el origen para la respuesta ante cambios en $d(s)$. La ganancia en estado estacionario entre $y(s)$ y $r(s)$ es igual a uno, lo que implica que se tendrá un error en estado estacionario igual a cero. El cero en el origen de la respuesta entre $y(s)$ y $d(s)$ indica que la perturbación será rechazada completamente en estado estacionario.

A continuación, se presenta la propuesta de cómo elegir los valores K_p , K_i y K_d de los controladores y del bloque de filtro F para lograr una respuesta en lazo cerrado deseada.

III. RESULTADOS

A. Derivación de la sintonización

Con el controlador PID, es posible definir completamente los polos en lazo cerrado, sin embargo, los ceros quedan establecidos automáticamente, dado que también depende de las ganancias del controlador.

Por lo tanto, la sintonización que se propone en este trabajo sigue los siguientes criterios:

1. Con las ganancias del controlador, se definen los polos en lazo cerrado. Para ello se va a suponer que se tendrá dos polos dominantes complejos, junto con un polo real no dominante.
2. El bloque de filtro tiene como objetivo contrarrestar los ceros de lazo cerrado que aparecen en la función de transferencia entre la referencia y la salida, de manera que la sintonización se pueda ajustar como si la respuesta en lazo cerrado fuera solamente de segundo orden sin ceros.

Con esto en mente, la función de transferencia de lazo cerrado deseada se define como:

$$M_{yr}(s) = \frac{1}{\left(\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\xi\left(\frac{s}{\omega_n}\right) + 1\right)\left(\frac{\alpha}{\xi\omega_n}s + 1\right)} \quad (6)$$

donde ω_n es la frecuencia natural de lazo cerrado, ξ es el factor de amortiguamiento y α es una constante que hace que el polo real sea menos dominante que los polos complejos del factor cuadrático ($\alpha < 0,1$ es un valor recomendado para ello). La idea de colocar un polo no dominante es uno de los aportes de este trabajo. La ventaja de colocarlo de esta manera es que permite al diseñador elegir la respuesta de una manera sencilla, puesto que solo se deben definir los parámetros ω_n y ξ , que tienen significados físicos reconocibles: ω_n está relacionado con la velocidad de la respuesta, mientras que ξ está relacionado con el nivel de oscilación de la respuesta.

Se debe notar que la respuesta deseada no tiene ceros, por lo que la función del filtro es cancelar estos ceros. Por lo tanto, tomando en cuenta (5), se tendría que:

$$F(s) = \frac{K_i}{K_d s^2 + K_p s + K_i} \quad (7)$$

Este filtro debe tener una ganancia unitaria en estado estacionario, por esta razón es necesario que el numerador tenga la constante K_i .

Expandiendo el denominador de (6) se llega a que su ecuación característica sería:

$$\frac{\alpha}{\xi\omega_n^3}s^3 + \frac{1}{\omega_n^2}(1 + 2\alpha)s^2 + \frac{1}{\xi\omega_n}(2\xi^2 + \alpha)s + 1 = 0 \quad (8)$$

Por otro lado, al expandir el denominador de (5), se llega a que la ecuación característica del sistema realimentado sería:

$$\frac{\tau_1\tau_2}{KK_i}s^3 + \frac{\tau_1 + \tau_2 + KK_d}{KK_i}s^2 + \frac{1 + KK_p}{KK_i}s + 1 = 0. \quad (9)$$

Por lo que es posible entonces, a la hora de igualar los términos de las ecuaciones (8) y (9) encontrar la sintonización que haría que el conjunto del controlador C y filtro F logren una respuesta en lazo cerrado igual a M_{yr} :

$$\begin{aligned}
K_p &= \frac{1}{K} \left(\frac{\tau_1 \tau_2 \omega_n^2 (2\xi^2 + \alpha) - \alpha}{\alpha} \right), \\
K_i &= \frac{\tau_1 \tau_2 \xi \omega_n^3}{\alpha K}, \\
K_d &= \frac{1}{K} \left(\frac{1 + 2\alpha}{\alpha} \tau_1 \tau_2 \xi \omega_n - (\tau_1 + \tau_2) \right).
\end{aligned} \tag{10}$$

Para que estas sintonizaciones permitan tener un lazo estable, se requiere que se cumplan las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
\xi \omega_n &> \frac{\alpha}{1 + 2\alpha} \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \\
\omega_n^2 &> \frac{\alpha}{2\xi^2 + \alpha} \frac{1}{\tau_1 \tau_2}
\end{aligned} \tag{11}$$

B. Cuestiones prácticas de implementación

La ecuación del controlador en (2) no es implementable físicamente, puesto que no es posible tener un derivador puro. Lo que se suele hacer es realizar una aproximación del derivador, de manera que la función de transferencia del PID quede de la forma:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d \frac{s}{\beta \frac{K_d}{K_p} s + 1} \tag{2}$$

con $\beta=0,01$.

IV. DISCUSIÓN

La regla de sintonía en (10) definen completamente los valores del controlador PID, pero permite que la persona encargada de la sintonización pueda decidir la velocidad de reacción mediante la elección de ω_n y la oscilación mediante ξ .

Sin pérdida de generalidad, se va a tomar una planta de prueba con parámetros $K = 1$, $\tau_1 = 1$ s y $\tau_2 = 0,8$ s, que representa una planta cuya constante de tiempo más significativa es de un segundo, y la segunda constante de tiempo es 20% menor. Para cuantificar los resultados, se utiliza la integral del valor absoluto del error (IAE):

$$IAE = \int_0^{\infty} |r(t) - y(t)| dt,$$

como una medida del desempeño del lazo cerrado, de esta manera, cuanto menor sea el valor de IAE, mejor desempeño se tiene. Así mismo, se utiliza la variación total (TV) como una medida del esfuerzo de control asociado:

$$TV = \sum_{i=0}^{n_p-1} |u(t_{i+1}) - u(t_i)|,$$

donde la señal u se muestrea con un periodo de muestreo constante con un total de n_p muestras. Para medir la estabilidad relativa, se tomará en cuenta el margen de fase (PM):

$$PM = 180 + \angle(P \cdot C),$$

el margen de ganancia no se considera en este caso, porque dado que la planta es de segundo orden y el controlador en (12) tiene dos ceros y dos polos, el sistema en lazo abierto PC nunca atraviesa los -180° y por lo tanto el margen de ganancia en todos los casos es infinito.

En la Fig. 2 se muestra el efecto de variar el valor de ω_n en la sintonización del controlador. Como se puede observar en la Fig. 2a, cuanto mayor es ω_n la respuesta es más rápida, tanto para seguimiento de referencia como rechazo de perturbaciones. Se debe notar, para el seguimiento de referencia, que en ninguno de los casos se tiene un sobrepaso, y esto se debe al hecho de que el ξ en todos los casos es igual a uno, lo que corresponde a una respuesta críticamente amortiguada.

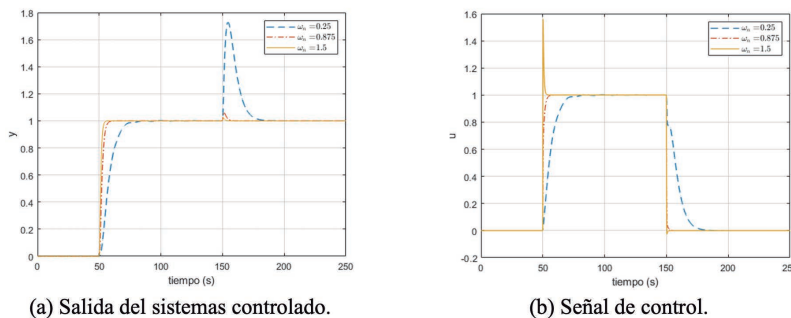


Fig.2. Variación de la respuesta en lazo cerrado para varios ω_n y $\xi=1$.

Conforme se hace ω_n más grande, tanto la respuesta servo como de rechazo de perturbaciones mejora, puesto que el ancho de banda es mayor, y por lo tanto el controlador puede actuar sobre un rango más amplio de frecuencias. Pero esta mejora viene asociada con un costo, puesto que la señal de control se vuelve más “brusca”, obligando al sistema a tener cambios más abruptos y picos más grandes. Para cuantificar estos resultados, en el Cuadro I se presentan los valores de IAE y TV para todos los casos estudiados. Como se puede observar, conforme se aumenta ω_n , el valor de IAE disminuye, lo que implica un mejor rendimiento.

Nótese la gran mejora que ocurre al comparar los resultados para $\omega_n = 0,25$ y $\omega_n = 1,5$. Por supuesto, esto requiere un esfuerzo de control mayor. En todos los casos, el margen de fase da un valor bastante bueno, mayor a 80° , sin embargo, a partir de los resultados, es claro que existe un valor de ω_n que maximiza el margen de fase, con un menor TV y un IAE aceptable. La búsqueda de esta frecuencia se presentará en trabajos posteriores.

CUADRO I
RESULTADOS DE LA RESPUESTA EN LAZO CERRADO, VARIANDO ω_n .

ω_n	IAE	TV	PM
0,25	16,4429	2,0416	80,9886
0,875	2,5871	2,0000	90,5458
1,5	1,4375	3,1714	84,5575

Este mismo estudio se puede realizar variando ξ , tal y como se presenta en la Fig. 3 y el Cuadro II. Como se puede observar, para ξ bajos y altos, el IAE aumenta, lo que indica que hay un valor de ξ que puede minimizar el IAE y maximizar el PM. Caso contrario ocurre con el TV, que conforme se aumenta el ξ (es decir, que se minimiza la oscilación) va disminuyendo la variación total de la salida de control, por lo que se requeriría menos esfuerzo de control. Quedará entonces para trabajos futuros encontrar los valores de ω_n y ξ que minimicen el IAE, TV y maximice el PM, pero siempre bajo la ley de control presentada en (10).

CUADRO II
RESULTADOS DE LA RESPUESTA EN LAZO CERRADO, VARIANDO ξ .

ω_n	IAE	TV	PM
0,2	5,3404	7,8535	26,1612
0,7	1,9462	2,4442	94,1237
1,2	2,5880	2,0074	86,6586

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó una nueva sintonización para controladores PID más filtro, que permite, de manera analítica, controlar plantas de segundo orden sobreamortiguadas, de manera que el sistema controlado en lazo cerrado se comporte como si tuviera una respuesta de segundo orden. El método solo requiere que la persona que diseña el controlador decida el valor de ω_n y ξ en lazo cerrado. Se encontró que la regla de sintonización logra controlar las plantas y además que tiene buenos valores de margen de fase, excepto para valores pequeños de ξ , como era de esperarse. Para trabajos futuros, se establecerá un mecanismo para elegir el valor óptimo de ω_n que logre minimizar el IAE y el TV, así como maximizar el PM. Es muy poco probable que una única sintonización permita lograr estos tres objetivos, sin embargo, se pueden aplicar técnicas de optimización multiobjetivo para encontrar el mejor compromiso entre todas las funciones de costo.

REFERENCIAS

- [1] T. Samad, "A Survey on Industry Impact and Challenges Thereof [Technical Activities]," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, n.o 1, págs. 17-18, 2017. doi: 10.1109/MCS.2016.2621438
- [2] Q. Mao, Y. Xu, J. Chen, J. Chen y T. T. Georgiou, "Maximization of Gain/Phase Margins by PID Control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 70, n.o 1, págs. 34-49, 2025. doi: 10.1109/TAC.2024.3417717
- [3] J. Garrido, S. Garrido-Jurado, F. Vázquez y O. Arrieta, "Design of Multivariable PID Control Using Iterative Linear Programming and Decoupling," *Electronics*, vol. 13, n.o 4, 2024, issn: 2079-9292. doi: 10.3390/electronics13040698 dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/4/698>
- [4] S. B. Joseph, E. G. Dada, A. Abidemi, D. O. Oyewola y B. M. Khammas, "D Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems," *Heliyon*, vol. 8, n.o 5, 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09399
- [5] J.-C. Shen y H.-K. Chiang, "PID tuning rules for second order systems," en 2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No.04EX904), vol. 1, 2004, 472-477 Vol.1.
- [6] X. Hu, W. Tan y G. Hou, "Tuning of PID/PID2 Controllers for Second Order Oscillatory Systems with Time Delays," *Electronics*, vol. 12, n.o 14, 2023, issn: 2079-9292. doi: 10.3390/electronics12143168 dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/14/3168>