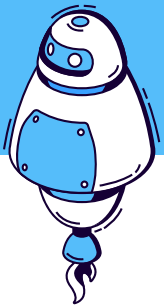


Ingeniería

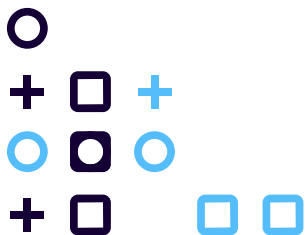
Revista de la Universidad de Costa Rica



V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería

“La diversidad de la investigación de la Facultad para el beneficio
de las comunidades”.

2023





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

5 y 6 de octubre de 2023

PERSONAS EDITORAS

Orlando Arrieta-Orozco

Víctor Schmidt-Díaz

Luis Manuel Zamora-González

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

INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA EDITORIAL DEL VOLUMEN ESPECIAL

IEEE:

[1] O. Arrieta-Orozco, L. M. Zamora-González, and V. Schmidt-Díaz, Eds., “V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2023”. En *Revista Ingeniería*, Volumen 34 NE4. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2024, pp 1-156. Doi 10.15517/ri.v34iNE5.59019.

APA:

Arrieta-Orozco, Zamora-González, & Schmidt-Díaz, V. (Eds). (2024). V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2023. En *Revista Ingeniería*, Volumen 34 NE4 (pp 1-156). Universidad de Costa Rica. Doi: 10.15517/ri.v34iNE5.59019.

Diseño de portada: Dyann Pamela Castro Sánchez

Diagramación: Melissa González Villalobos.

CEDAA - INII - FI

TABLA DE CONTENIDOS

Presentación	V
Acerca de este Volumen Especial de la Revista de Ingeniería	VII
Acerca de las personas editoras de este Volumen Especial	IX
Economía circular/Movilidad segura y eficiente	1
Método para calificar la accesibilidad al sistema de transporte público	2
Control de tracción basado en aceleración límite para plataformas móviles autobalanceadas ...	11
Novedades en el diseño de estructuras y la inspección	20
Uso de marcos con riostras intencionalmente excéntricas en edificios de gran altura	21
Correlaciones entre medidas de intensidad sísmica y parámetros de demanda de ingeniería:	
Un caso para Costa Rica	28
Assessing intervention measures to improve ventilation rates in an university classroom	37
Desarrollo de una metodología de inspección de puentes utilizando sistemas aéreos no tripulados	45
Materiales de construcción	54
Evaluación de propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos de Costa Rica	55
Comparación de los criterios de falla para fatiga: caso mezcla asfáltica en Costa Rica	63
Mezclas para coronamiento de especímenes de bases estabilizadas para ensayo de resistencia a compresión	70
Tratamiento de aguas residuales y modelado hidrometeorológico	79
Inventario de plantas ornamentales utilizadas en biojardineras en Costa Rica	80
Evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales con reactor anaeróbico en Costa Rica	88
Crecimiento urbano, precipitación y escorrentía ante el cambio climático: una exploración a través de modelos de automata celular en la Gran Área Metropolitana, Costa Rica	97
Avances en la robótica	108
Implementación y prueba de algoritmos para navegación en una plataforma robótica de configuración diferencial	109
Módulo de ROS2 para la estimación de la posición y orientación de un sensor de fuerzas	119
Infraestructura de Hardware y Software para expresiones emocionales de un robot humanoide	128
Energías renovables, y gestión ambiental	137
Control de un aerogenerador de alta potencia	138
Gestión ambiental de baterías de VEs tras concluir su vida útil en Costa Rica	147

PRESENTACIÓN

Esta publicación corresponde a las ponencias presentadas en las quintas Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 5JIFI, 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 5JIFI fue “la diversidad de la investigación de la Facultad para el beneficio de las comunidades”, motivados por un análisis de las investigaciones registradas en la Facultad, a nivel de grado y posgrado, y los proyectos inscritos en las vicerrectorías de Investigación, Acción Social y Docencia, durante el año 2022.

Para ese año, 513 estudiantes presentaron la propuesta o estaban matriculados en investigación dirigida, práctica dirigida o seminario de graduación I, II y III; 25 estudiantes en proceso o finalizando la maestría académica, la maestría profesional o el doctorado; 86 proyectos inscritos en la Vicerrectoría de Investigación, 45 en la Vicerrectoría de Acción Social y 1 en la Vicerrectoría de Docencia. Ante la gran cantidad de temas de investigación y su variedad, se priorizaron los siguientes:

- Ingeniería y arquitectura inclusivas y en sintonía con el entorno.
- Aplicaciones diversas de las metodologías de trabajo colaborativas para la creación y gestión de proyectos.
- Uso de vehículos aéreos no tripulados en proyectos de ingeniería y arquitectura.
- Innovaciones en el diseño y la operación de los sistemas y la infraestructura de servicios relacionados con el recurso hídrico.
- Estudios sobre eventos extremos hidrometeorológicos.
- Diseño de sistemas contra incendios en edificaciones con usos diversos.
- Uso de energías renovables, y uso óptimo de la producción de energía.
- Avances para la industria de los dispositivos médicos.
- Ingeniería en función de la salud.
- Robots para el mejoramiento de la vida cotidiana y de la industria, edificios inteligentes e internet de las cosas.
- Aprovechamiento de materiales orgánicos en la generación de nuevos productos.
- Afectación por el cambio climático en el sector agrícola.
- Reducción de la generación de gases de efecto invernadero.
- Factibilidad técnica y financiera del procesamiento y producción de alimentos.
- Caracterización, evaluación y conservación de los suelos.
- Avances en la investigación sobre los catalizadores.
- Diseño y uso de baterías.

- Nuevas opciones para el manejo y el aprovechamiento de los residuos sólidos.
- Innovación y mejoramiento de materiales de construcción.
- Desarrollo de materiales y tecnología para su uso fuera de la Tierra.
- Hacia una movilidad segura y eficiente.

Después de la convocatoria y el envío de ponencias, se realizó un proceso de revisión que incluyó aspectos de formato, plagio, impacto y calidad, entre otros; todas fueron evaluadas por al menos dos pares externos al grupo organizador. De las 25 ponencias enviadas, 19 fueron aprobadas y 18 se presentaron en las 5JIFI. Estas correspondían a investigaciones de diferentes escuelas (Ingeniería Industrial (1), Ingeniería Química (2), Ingeniería Mecánica (1), Ingeniería Civil (6), Arquitectura (1), Ingeniería en Biosistemas (1), Ingeniería Topográfica (1) e Ingeniería Eléctrica (5)) y laboratorios (LANAMME (3), CERLab (1) y LIS (1)), un programa (ProDUS (1)), un centro (CIEDES (1)) y un instituto (INII (5)); todas realizadas por estudiantes, docentes e investigadores en conjunto o de forma individual, y en varios casos, con la colaboración de universidades extranjeras.

Las 5JIFI se realizaron los días 5 y 6 de octubre del año 2023 en el Miniauditorio 1 de la Facultad de Ingeniería, agrupando las ponencias en 6 bloques según la temática, y se contó con la colaboración, como moderadores, de representantes de varias escuelas y de miembros de la organización.

La ponencia inaugural sobre la planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) en Puerto Viejo de Limón, estuvo a cargo del Ing. Álvaro Araya García M.Sc., profesor de la Universidad Técnica Nacional (UTN) y director de saneamiento de sistemas periféricos del AyA; y la mesa redonda final sobre los nuevos rumbos de la investigación en la Facultad de Ingeniería, fue moderada por el Ing. Orlando Arrieta Orozco, Ph.D., decano de la Facultad de Ingeniería, y tuvo como participantes a la M.Sc. Yamileth Astorga Espeleta, coordinadora de Red GUIAS-UCR, a la M.Sc. Eugenia Cordero García, directora de Gestión de la Investigación de la Vicerrectoría de Investigación, y al Ing. Erick Centeno Mora, Ph.D., docente e investigador de la escuela de Ingeniería Civil.

De acuerdo con la discusión en la mesa redonda se presentan desafíos importantes para la investigación en la Facultad: incentivar el trabajo conjunto entre escuelas, facultades, centros e institutos de la Universidad para enriquecer aún más la investigación; continuar con la investigación en beneficio de las comunidades para lograr un mayor impacto desde la Universidad; y mejorar y priorizar la divulgación de la investigación y sus resultados a las comunidades. Las Jornadas de Investigación continuarán siendo un espacio de encuentro y una importante opción para mostrar las investigaciones que se realizan en la Facultad, incentivando a todas las personas docentes, investigadoras y estudiantes.

Editores del volumen especial:

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

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

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

ACERCA DE ESTE VOLUMEN ESPECIAL DE LA REVISTA INGENIERÍA

Este Volumen Especial es una memoria de las V Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica, en la que se exponen 17 de las 19 ponencias que aprobaron las revisiones de pares, de formato y de plagio. Las jornadas se desarrollaron de forma presencial, los días 5 y 6 de octubre de 2023.

Revisión de pares

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

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

Revisión de formato

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

- Tema enmarcado en una de las áreas temáticas definidas para el evento.
- 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)	Mag. Ana Grettel Molina González
Escuela de Ingeniería en Biosistemas (EIB)	Dra. María José Rodríguez Vásquez
Escuela de Ciencias de la Computación e Informática (ECCI)	Dr. Allan Berrocal Rojas
Escuela de Ingeniería Civil (EIC)	M.Sc. Alejandro Navas Carro
Escuela de Ingeniería Eléctrica (EIE)	Dr. Diego Dumani Jarquín
Escuela de Ingeniería Industrial (EII)	Dr. Roberto Quirós Vargas

Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM)	Dra. Alejandra Sánchez Calvo
Escuela de Ingeniería Química (EIQ)	Dr. Lautaro Ramírez Varas
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. Orlando Arrieta Orozco

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

Dr. Víctor Schmidt Díaz.

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

Ing. Luis Manuel Zamora González

Licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad de Costa Rica. Egresado de la Maestría Interdisciplinaria en Gestión Ambiental y Ecoturismo de la Universidad de Costa Rica. Actualmente es docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Civil y coordinador del Consejo de Evaluación de la Vicerrectoría de Investigación (CEVI).

Economía circular/ Movilidad segura y eficiente

Método para calificar la accesibilidad al sistema de transporte público

Rating Method for Public Transport System Accessibility

Diego Soto Matarrita

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

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

Palabras clave:

Accesibilidad, caminabilidad, movilidad, red peatonal, transporte público.

Keywords:

Accessibility, mobility, pedestrian network, public transport, walkability.

RESUMEN

En el Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la Gran Área Metropolitana (SITGAM) se establecen una serie de objetivos para propiciar la integración del servicio de transporte público, así como una serie de indicadores para dar seguimiento a su avance. El objetivo de esta investigación es desarrollar el método para calificar el indicador número 22 del SITGAM, correspondiente a la accesibilidad al sistema de transporte público. Para ello, se realiza una revisión del material existente a nivel nacional e internacional para la evaluación de la accesibilidad de la infraestructura en la red peatonal con el fin de compilar un método relevante en el contexto nacional. Actualmente se encuentra en desarrollo el método. Como resultado de la investigación, se generará una guía para replicar el método en todos los corredores de transporte público considerados en SITGAM, y se aplicará la metodología en un tramo de la troncal San José – Sabanilla – La Campiña para ejemplificar el uso de la herramienta de calificación y hacer recomendaciones para la mejora de la accesibilidad al sistema en el tramo.

ABSTRACT

Within the Integrated Mass Public Transport System Program for Costa Rica's Great Metropolitan Area (SITGAM), a group of objectives have been established to accomplish the integration of the current public transport system, as well as a group of indicators in order to trace the goals' progress. This research's goal is to develop a rating method for SITGAM's 22nd indicator regarding Public Transport System Accessibility. A thorough research was made from national and international sources on the matter of accessibility and walkability in pedestrian networks, in order to generate a relevant method within Costa Rican reality. The method is currently being developed. This research's main result will be a guide to apply the method in all the public transport routes considered in SITGAM, as well as the application of the method in a section of the San José – Sabanilla – La Campiña mainline in order to exemplify the use of the rating tool, as well as giving recommendations to improve accessibility in this section.

I. INTRODUCCIÓN

A. El problema específico

El Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la Gran Área Metropolitana (SITGAM 2020-2035) es un informe que recopila 206 proyectos relacionados con la movilidad y el transporte público en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM). SITGAM pretende alcanzar una serie de metas que reflejen una mejora respecto del estado determinado en las auditorías sobre la integración del servicio, realizadas por la Contraloría General de la República en 2019. Esto con el fin de lograr el desarrollo de un Sistema Integrado de Transporte Público en la GAM para el 2035. Para ello, SITGAM [1] establece siete ejes estructurales que identifican y sistematizan todas las iniciativas existentes en temas relacionados al transporte y la movilidad como su planificación, gobernanza, descarbonización, financiamiento, entre otros. Cada eje estructural cuenta con un marco lógico y recopila las propuestas y proyectos asociadas a él.

Como mecanismo de medición del avance y el cumplimiento de las metas que se establecen en el informe, SITGAM plantea una serie de 41 indicadores. Con esta investigación se propone generar un método para el cálculo del indicador asociado a la meta número 22, que forma parte del segundo eje estructural del SITGAM, el cual trata sobre la experiencia de las personas usuarias. La meta pretende lograr para el 2035 un 80% de avance en el indicador de accesibilidad al sistema de transporte público. La accesibilidad al sistema evalúa la existencia y calidad de la infraestructura de la red peatonal que alimenta el sistema de transporte público de la GAM. Según [2], este indicador constituye a su vez un 40% del Índice de Integración Física (IIF) del sistema que se califica con una escala del 0 al 100. El restante 60% del IIF se califica mediante la integración en los nodos.

En SITGAM se propone inicialmente calificar la accesibilidad al sistema mediante la Guía de Inventario y Evaluación de Aceras [3] desarrollada por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME-UCR). Para este proyecto se propone complementar esta metodología con otras variables que evalúen los entornos de movilidad que alimentan el sistema de transporte de una forma más integral, incluyendo aspectos como la seguridad, el confort y el atractivo, como se establece en [4].

El método de calificación de accesibilidad al sistema se aplicará a un tramo de la troncal de transporte público San José – Sabanilla – La Campiña. La investigación tiene como resultado dos productos: una serie de recomendaciones para la mejora de la accesibilidad al sistema en el tramo de la troncal bajo estudio y la guía con los pasos a seguir para replicar el método de calificación de la accesibilidad al sistema en las demás troncales de transporte público establecidas en el SITGAM.

B. Objetivo general

Desarrollar un método para calificar la accesibilidad al sistema de transporte público, como parte del Índice de Integración Física establecido en el Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la Gran Área Metropolitana (SITGAM), mediante el análisis de un tramo de la troncal San José – Sabanilla – La Campiña.

C. Objetivos específicos

1. Generar un método para la calificación de la accesibilidad al sistema de transporte público.
2. Aplicar el método en el análisis de la accesibilidad al sistema en un tramo de la troncal de transporte público San José – Sabanilla – La Campiña.
3. Producir una guía metodológica con los pasos a seguir para replicar la metodología de análisis de la accesibilidad al sistema de transporte público.

II. METODOLOGÍA

El proyecto se divide en tres fases principales: el desarrollo del método de análisis de la accesibilidad al sistema, la aplicación del método en un tramo de la troncal San José – Sabanilla – La Campiña y la compilación de una guía metodológica para replicar el análisis de la Accesibilidad al Sistema en otros tramos y troncales. El diagrama que ilustra la metodología para la elaboración del proyecto se muestra en la Fig. 1.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Desarrollo del método para la calificación de la accesibilidad al sistema

En primera instancia, se realizó una investigación bibliográfica de trabajos anteriores y metodologías existentes para evaluar el estado de la infraestructura peatonal. Las metodologías consideradas para extraer variables que influyeran en la accesibilidad al sistema de transporte público se encuentran en [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [9]. También se tomó como insumo un indicador desarrollado en el Trabajo Comunal Universitario 756 de la Universidad de Costa Rica para la calificación del índice de género-sensibilidad en la infraestructura para la movilidad (indicador número 32 del SITGAM).

Una vez se han identificado las posibles variables que se pueden utilizar para la calificación de la accesibilidad al sistema, se realiza un proceso de selección de criterios. Para seleccionar los indicadores que se evaluarán en la metodología propuesta, se deben tener en cuenta algunas consideraciones básicas. Litman [10] establece que la manera en que algo se mide puede repercutir en cómo se percibe su valor o estado. Por lo tanto, los indicadores deben ser seleccionados cuidadosamente para proveer información relevante. Además, como en la mayoría de los casos no existe un solo indicador que sea adecuado para todo el contexto, se recomienda hacer una selección de varios indicadores que midan los impactos del fenómeno bajo estudio.

Dentro de los criterios de selección, se busca que los indicadores sean: representativos, comparables, fáciles de comprender para quien desee aplicar el método, que la información que evalúan sea accesible, que su medición sea económica, que se le puedan asignar objetivos de rendimiento, así como la frecuencia de aparición en las referencias consultadas, la facilidad de

intervenir dicha variable, su efecto en poblaciones como la niñez, la población adulta mayor, las mujeres, la población sexualmente diversa y la población con discapacidad y finalmente, su relevancia en el contexto nacional.

Tomando en cuenta las variables identificadas para el método y los criterios de selección mencionados anteriormente, se genera una matriz de selección en la cual a cada variable se le asigna una calificación para cada uno de los criterios. Esta calificación va del 0 al 2, donde 0 indica que la variable no cumple con el criterio, el 1 significa que la variable cumple parcialmente con el criterio y el 2 implica que la variable cumple con el criterio de selección. El único criterio que se evalúa de forma distinta es la relevancia para el contexto nacional, cuya respuesta es sí o no dependiendo de la importancia que toma la variable en relación con el clima, contexto, infraestructura y otros aspectos de la realidad costarricense.

Este proceso de selección se repite para las variables de las cuatro dimensiones de la caminabilidad establecidas por [4]: accesibilidad, seguridad, confort y atractivo, y evaluadas en tres elementos de la infraestructura peatonal: aceras, cruces peatonales y paradas de transporte público. En el CUADRO I se muestran las variables seleccionadas para el indicador.

CUADRO I.
VARIABLES SELECCIONADAS PARA EL INDICADOR DE ACCESIBILIDAD.

Dimensión	Elemento		
	Aceras	Cruces peatonales	Paradas
Accesibilidad	Material de superficie Ancho libre Continuidad: huecos, Pendiente transversal Pendiente longitudinal Infraestructura de acceso universal	Ancho libre Condiciones en rampas: pendiente, obstáculos, coincidencia con el cruce Infraestructura de acceso universal	Se califica según el indicador 33 del SITGAM (desarrollado Seguridad en el TCU 756)
Seguridad	Iluminación Visibilidad de fachada	Iluminación	
Confort	Presencia de refugio y sombra Vegetación	*se contempla en el apartado de accesibilidad	
Atractivo	Variedad en el uso de suelo	Variedad en los usos de suelo	

Finalmente, a cada una de las variables seleccionadas se les asigna un peso para su ponderación dentro del indicador. Actualmente esta es la etapa que se encuentra en desarrollo. Para ello, se procede con un proceso iterativo en el cual se propone una ponderación para las variables, se miden las condiciones en campo y se ajustan los pesos de acuerdo con calificación obtenida y si esta refleja el estado de la infraestructura o no.

También durante este procedimiento se hacen ajustes en la calificación del indicador, eliminando parámetros confusos, ambiguos o altamente subjetivos. En el CUADRO II se muestra la propuesta inicial de ponderación para la calificación de la accesibilidad en las aceras, mientras que en el CUADRO III se muestra la ponderación propuesta para los cruces peatonales.

CUADRO II.
ESCALA DE MEDICIÓN PRELIMINAR PARA EL ESTADO DE LAS ACERAS.

Accesibilidad (60%)			
Superficie	Ancho libre	Huecos /Pérdida de adoquines	
60	10	5	
0 - Concreto, adoquín 5 - Cerámica 28 - Lastre, césped... 60 - No hay acera	0 - $1.5 \text{ m} \leq A$ 3 - $1.2 \text{ m} \leq A < 1.5 \text{ m}$ 5 - $A < 1.2 \text{ m}$	0 - $D \leq 10 \text{ cm}$, $h \leq 10 \text{ mm}$ 2 - $10 < D \leq 30 \text{ cm}$ o $10 < h \leq 30 \text{ mm}$ 3 - $10 < D \leq 30 \text{ cm}$ y $10 < h \leq 30 \text{ mm}$ 4 - $D > 30 \text{ cm}$ o $h > 30 \text{ mm}$ 5 - $D > 30 \text{ cm}$ y $h > 30 \text{ mm}$	0 - Ningún adoquín perdido 2 - Un adoquín aleatorio 3 - 2 o más, no afectan 5 - 2 o más, afectan circulación
	Tapas o rejillas	Drenaje/ Sedimentos	
	2	3	
	0 - No afectan circulación 1 - Aberturas $> 5 \text{ cm}$ y $\leq 8 \text{ cm}$ 2 - Aberturas $> 8 \text{ cm}$	0 - Charco $\leq 10 \text{ cm}$ 2 - $10 \text{ cm} < \text{Charco} \leq 30 \text{ cm}$ 3 - Charco $> 30 \text{ cm}$	
Depresiones	Grietas	Obstrucciones	Escalonamiento
7	5	3	7
0 - $D \leq 15 \text{ mm}$ 3 - $15 \text{ mm} < D \leq 30 \text{ mm}$ 7 - $D > 30 \text{ mm}$	0 - $G \leq 10 \text{ mm}$ 3 - $10 \text{ mm} < G \leq 25 \text{ mm}$ 5 - $G > 25 \text{ mm}$	0 - $A \geq 1.8 \text{ m}$ 1 - $1.5 \text{ m} \leq A < 1.8 \text{ m}$ 2 - $1.2 \text{ m} \leq A < 1.5 \text{ m}$ 3 - $A < 1.2 \text{ m}$	0 - $E \leq 2 \text{ cm}$ 4 - $2 \text{ cm} < E \leq 5 \text{ cm}$ 7: $E > 5 \text{ cm}$
Pendiente longitudinal	Pendiente transversal	Infraestructura de acceso universal	Rampas
5	5	3	5
0 - $\leq 5\%$ 2 - $> 5\%$, $\leq 8\%$ 5 - $> 8\%$	0 - $\leq 2\%$ 2 - $> 2\%$, $\leq 3\%$ 4 - $> 3\%$, $\leq 5\%$ 5 - $> 5\%$	0 - Existe, continua 2 - Existe, discontinua 3 - No existe	0 - Rampas en buen estado 1 - Rampas que incumplen 3 - Faltan rampas en varios lugares 5 - No existen rampas
Seguridad (25%)			
Iluminación	Visibilidad de fachada		
15	10		
0 - $L \geq 20 \text{ lux}$ 5 - $5 \text{ lux} \leq L < 20 \text{ lux}$ 10 - $L < 5 \text{ lux}$	0 - No hay ninguna fachada ciega 3 - Fachadas ciegas $\leq 30\%$ 5 - Fachadas ciegas $\leq 50\%$ 10 - Fachadas ciegas $> 50\%$		
Confort (10%)			
Sombra y refugio	Sombra y refugio		
5	5		

0 - Refugio de lluvia y sol al 100%	0 - Al menos el 50% cuenta con arbolado
1 - Refugio en al menos el 50%	3 - Arbolado menor al 50%
3 - Refugio en menos del 50%	5 - No hay arbolado
5 - No hay refugio	

Atractivo (5%)**Variedad en el uso del suelo****5**

- | |
|--|
| 0 - Al menos 4 usos de suelo distintos |
| 2 - Al menos 2 usos de suelo |
| 5 - Solo 1 tipo de suelo |

CUADRO III.**ESCALA DE MEDICIÓN PRELIMINAR PARA EL ESTADO DE LOS CRUCES PEATONALES.**

Accesibilidad (50%)		
Ancho libre	Existencia de rampa	Pendiente de rampa
10	30	10 (5 cada lado)
0 - $1.5 \text{ m} \leq A$ 5 - $1.2 \text{ m} \leq A < 1.5 \text{ m}$ 10 - $A < 1.2 \text{ m}$	0 - Existe rampa a ambos lados del cruce 15 - Uno de los lados no cuenta con rampa de acceso 30 - Falta rampa de acceso a alguno de los lados	0 - Pendiente menor o igual al 10% h5 - Pendiente mayor a 10%
Infraestructura de acceso universal	Obstáculos en la rampa	Coincidencia rampa-cruce
10	10 (5 cada lado)	10 (5 cada lado)
0 - Existe, continua 5 - Existe, discontinua 10 - No existe	0 - $A \geq 1.8 \text{ m}$ 2 - $1.5 \text{ m} \leq A < 1.8 \text{ m}$ 4 - $1.2 \text{ m} \leq A < 1.5 \text{ m}$ 5 - $A < 1.2 \text{ m}$	0 - La rampa coincide con el cruce 5 - La rampa no coincide con el cruce
Seguridad (30%)		
Iluminación		
30		
0 - $L \geq 20 \text{ lux}$ 5 - $5 \text{ lux} \leq L < 20 \text{ lux}$ 10 - $L < 5 \text{ lux}$		
Atractivo (20%)		
Variedad en el uso de suelo (medido en las cercanías del cruce)		
20		
0 - Al menos 4 usos de suelo distintos 2 - Al menos 2 usos de suelo 5 - Solo 1 tipo de suelo		

B. Aplicación del método en un tramo de la troncal San José – Sabanilla – La Campiña

Una vez se distribuya los pesos de ponderación de las variables para el indicador, se procederá a realizar la evaluación de un tramo de la troncal San José – Sabanilla – La Campiña. Para ello,

se realizará en primera instancia un diagnóstico de la troncal para determinar un estado inicial de la misma. El tramo por evaluar será un tramo que presente una variedad de estados en su red peatonal, para poder ejemplificar el uso del método de la mejor manera posible. Además, a raíz de la evaluación de este tramo se proporcionarán algunas recomendaciones respecto de la intervención de la infraestructura peatonal presente en el mismo para mejorar su accesibilidad y así contribuir con el avance en los objetivos del SITGAM.

C. Guía metodológica para replicar el análisis de accesibilidad al sistema

Como parte final de esta investigación, se espera generar una guía para replicar el método de evaluación de la accesibilidad al sistema. Esta guía se plantea como un documento independiente y compacto que explique los pasos a seguir para evaluar la accesibilidad al sistema en cualquier troncal de transporte público. La idea principal es generar una herramienta fácil de utilizar y que proporcione resultados comparables para facilitar la intervención de la infraestructura en la red peatonal. También, como producto adicional de la investigación se considera desarrollar un mecanismo de registro de datos que facilite el procedimiento de calificación para la persona evaluadora, por ejemplo, en una aplicación móvil asociada a una base de datos que permita guardar los datos tomados directamente en campo, en forma de un formulario.

CONCLUSIONES

- La accesibilidad en la red peatonal que alimenta el sistema de transporte público es un elemento básico para la integración del sistema de transporte público en la GAM.
- El método en desarrollo proporcionará una guía para la estandarización de la evaluación de la accesibilidad, y ayudará en la priorización de la intervención de esta infraestructura tan importante para la movilidad.
- Se espera generar una herramienta estándar, fácil de comprender y utilizar para ayudar al proceso del seguimiento del indicador 22 del SITGAM.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, el agradecimiento a mi Comité Asesor del Trabajo Final de Graduación, especialmente a la directora de este proyecto, la Ing. Diana Jiménez Romero, quien ha sido la mejor guía y profesora en este proceso tan edificante. Por su amplio conocimiento, su apoyo, su infinita paciencia y su amabilidad hacia mí, siempre estaré agradecido. También el agradecimiento a los profesores Ing. Luis Zamora González e Ing. Henry Hernández Vega, pues ambos han sido excelentes guías y fuentes de conocimiento en este trabajo, han aportado muchísimo y se han encontrado siempre dispuestos a apoyarme.

También el agradecimiento a la teniente Raquel Valverde Flores, jefe de la Delegación Policial de Montes de Oca por su gran disposición a ayudar en esta investigación, su apoyo en la identificación

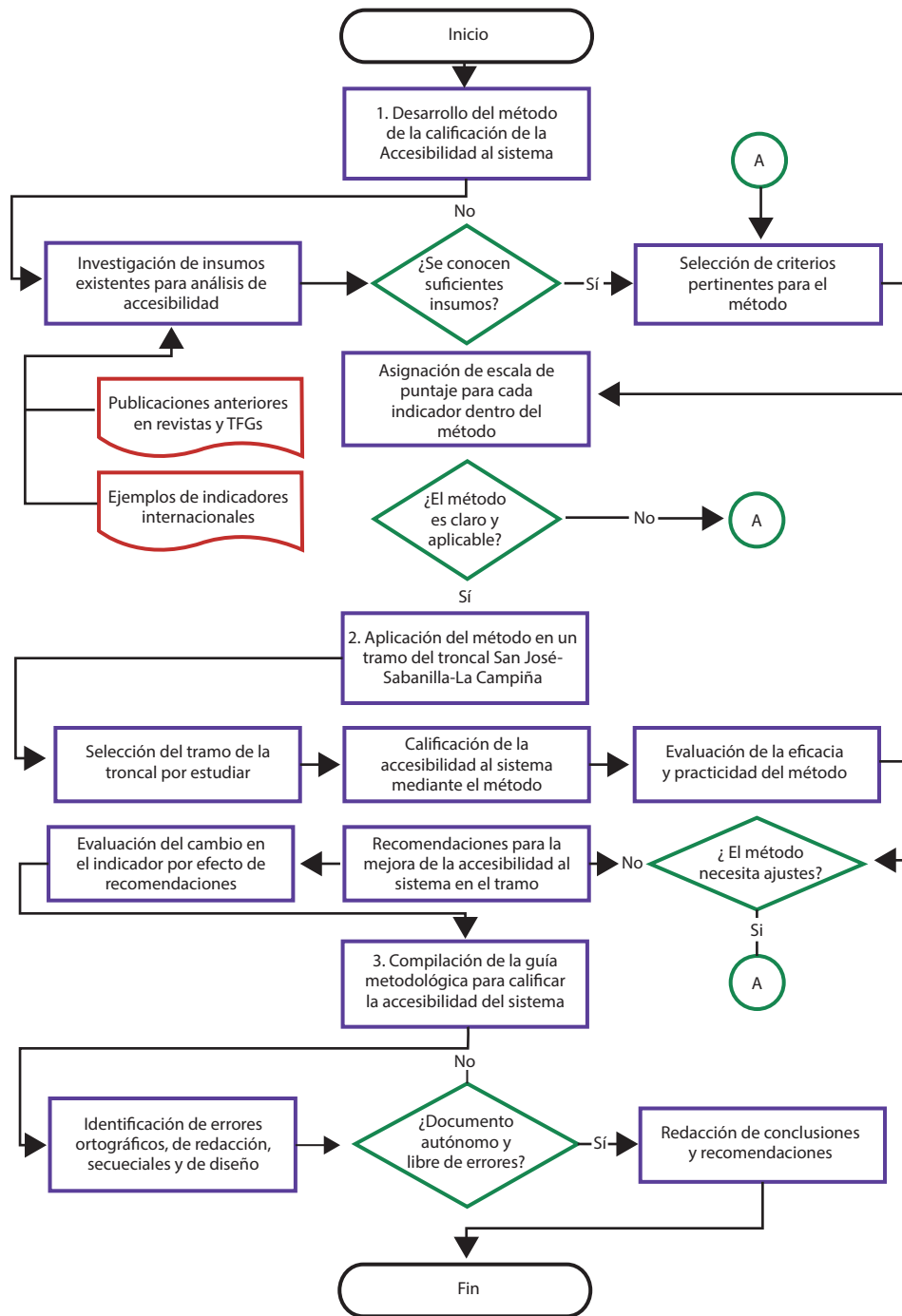
de variables de seguridad en la accesibilidad al sistema, así como el acompañamiento ofrecido para medir variables durante la noche fue de gran ayuda para el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, el agradecimiento más importante es a todas aquellas personas que me rodean, que hicieron esta investigación posible por su amor y cariño hacia mí. A mi familia, mi novio, mis amigas y amigos, compañeras y compañeros de la universidad y del trabajo, gracias por estar conmigo y apoyarme en este proceso.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, “Programa para un Sistema Integrado de Transporte Público Masivo para la GAM (SITGAM 2020-2035)”, Secretaría de Planificación Sectorial, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, San José, Costa Rica, 2020.
- [2] Contraloría General de la República, “Informe de auditoría operativa sobre la eficacia en la integración operacional y física de los servicios de transporte público y su contribución a la eficacia del servicio”, San José, Costa Rica, nov. 2019.
- [3] V. Vega y H. Hernández, “Guía de Inventario y Evaluación de Aceras”, San José, Costa Rica, dic. 2017.
- [4] R. Talavera-García, J. A. Soria-Lara, y L. M. Valenzuela-Montes, “La calidad peatonal como método para evaluar entornos de movilidad urbana”, *Doc Anal Geogr*, vol. 60, núm. 1, pp. 161– 187, 2014.
- [5] F. Torres Martínez, “Diseño de una metodología para la estimación del Índice de Caminabilidad: análisis de caso en Cartago, Costa Rica y Potchefstroom, Sudáfrica”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2019.
- [6] C. D. Montero Quesada y D. Jiménez Romero, “Desarrollo de una guía metodológica para el diseño y evaluación de infraestructura peatonal”, San José, Costa Rica, nov. 2021.
- [7] S. Fontán Suárez, “Índice de Caminabilidad Aplicado en la Almendra Central de Madrid”, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2012.
- [8] M. J. Freire, C. Campoverde, E. Puga, J. La Rota, y P. Jara, “Método para evaluar espacios peatonales urbanos y su aplicación en Ambato, Ecuador”. Universidad Tecnológica Indoamérica, Grupo FARO, Quito, 2020.
- [9] L. Sabino, B. Tini, B. Sato, D. Farias, y F. Pitombo, “Metodología para calcular el índice técnico de caminabilidad sensible al género”. Banco Interamericano de Desarrollo, agosto de 2022.
- [10] T. Litman, “Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning”, Victoria, BC, feb. 2011.

APÉNDICE I. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA



Control de tracción basado en aceleración límite para plataformas móviles autobalanceadas

Angular wheel acceleration based traction control for self-balanced mobile platforms

Arnoldo Castro

Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR

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

Palabras clave:

Control, segway, self-balance, tracción, vehículo.

Keywords:

Control, segway, self-balance, traction, vehicle.

RESUMEN

Cuando un vehículo de péndulo invertido de dos ruedas se encuentra con una superficie de baja tracción ve disminuida su capacidad para estabilizarse. Una técnica común para mejorar la tracción en estas condiciones es el uso de controladores que limitan la aceleración angular máxima en las ruedas. Se presentan simulaciones de un vehículo que emplea esta técnica. Se demuestra que la reducción en la aceleración angular máxima disminuye el deslizamiento de las ruedas a la vez que compromete la estabilidad del vehículo.

ABSTRACT

The capability of a two-wheeled inverted pendulum transporter is compromised when it travels over a slick surface. A method to improve wheel-ground traction under these conditions is to limit the maximum wheel angular acceleration. A traction controller based on this method is evaluated on a simulation of a self-balancing transporter. It shows that while the controller is capable of limiting the angular acceleration of the wheels, it reduces its ability to vertically stabilize itself.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando una de las ruedas de un vehículo autobalanceado pierde tracción la respuesta dinámica del vehículo puede ser peligrosa. La mayoría de la literatura enfocada en este tema se encarga de estudiar el comportamiento dinámico ante superficies de baja fricción [1] y la influencia del modelo de tracción a utilizar [2], [3]. Existen algunos intentos por eliminar la pérdida de tracción de estos vehículos pero al hacerlo degradan la estabilidad del sistema como un todo [4], [5].

La base del algoritmo de tracción de un vehículo autobalanceado comercial se describe en US Patent 6,408,240 [6]. La estrategia básica es similar a la utilizada en los frenos ABS de los automóviles. Si se detecta deslizamiento de la rueda entonces el torque alimentado se reduce hasta que la rueda deje de deslizar. En la patente se consideran dos tipos de deslizamiento. El primer tipo es cuando el vehículo trata de acelerar o decelerar mientras que el segundo tipo es cuando se encuentra una superficie de baja tracción.

El indicador que gobierna al control de tracción es la aceleración en las ruedas. Debido a que el torque de salida de los motores es limitado, la aceleración posible de las ruedas también es limitada. Si esta aceleración supera un límite especificado, el controlador asume que ha iniciado el deslizamiento y el control de tracción se activa. El torque alimentado se reduce a cero y si la condición de deslizamiento se desactiva, se aumenta gradualmente al valor requerido para balancear el vehículo. La computadora calcula la razón entre la inercia inversa con un mínimo y si está por debajo de este, la condición de deslizamiento se desactiva.

En las siguientes secciones se plantea un controlador basado en esta estrategia para minimizar la pérdida de tracción en la simulación de un vehículo de péndulo invertido de dos ruedas con parámetros ajustados a los de una Segway i2. Se simulan varios escenarios para evaluar la idoneidad de ser implementados en vehículos del tipo péndulo invertido.

II. METODOLOGÍA

Se hizo un estudio de la estrategia de control de tracción utilizada en vehículos autobalanceados comerciales. Se incorporó dicha estrategia a las ecuaciones de movimiento del vehículo. Se simularon acciones de aceleración en superficies con varios niveles de tracción máxima. Se comparó el ángulo máximo y el deslizamiento máximo en las ruedas al utilizar control de tracción contra los mismos escenarios sin control de tracción.

III. MODELO DINÁMICO

A. Modelo del vehículo

En la Figura 1 del vehículo a simular. Consiste de un péndulo compuesto de la base, el manubrio y la persona, montado sobre dos ruedas independientes. El vehículo es dirigido por el movimiento del centro de masa de la persona. El vehículo acelera en la dirección en que este centro de masa se desplaza.

Los motores están montados sobre la base del péndulo e impulsan las ruedas por medio de torques T_r y T_l , respectivamente. Las ruedas tienen un radio de r y el ancho de la base es $2w$. El origen de coordenadas es el punto central de la base y a partir de él se ubica el centro de masa del péndulo en el punto (x_{wp}, z_{wp}) .

La masa del péndulo es m_p , y sus momentos de inercia son I_{px} , I_{py} , y I_{pz} . Las llantas se consideran discos uniformes de masa m_w , con inercias rotacionales $I_{wx} = I_{wz}$, y I_{wy} . La inclinación del péndulo

respecto al eje vertical es θ_p . El ángulo de orientación del vehículo alrededor del eje Z es β y la velocidad está dada por v .

Existe deslizamiento en el punto de contacto de la llanta con el suelo por lo que:

$$\dot{\theta}_w r \neq v_w \tag{1}$$

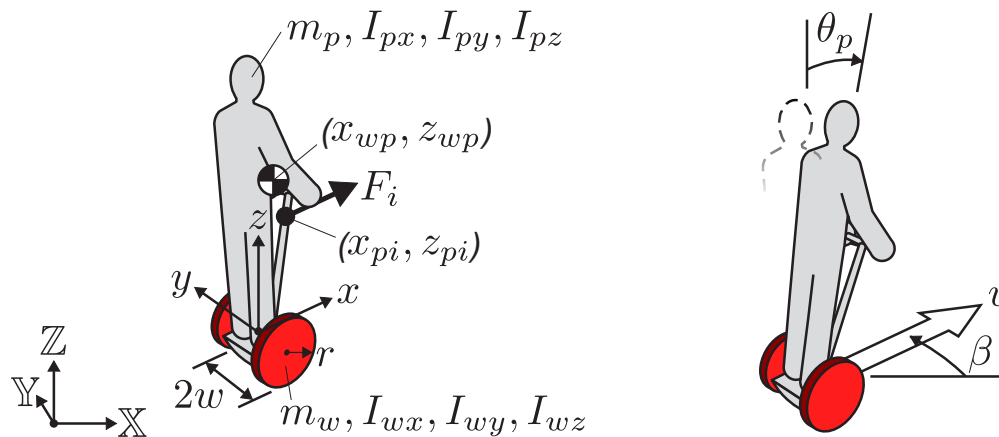


Fig. 1. Representación esquemática de un vehículo tipo péndulo invertido de dos ruedas.

donde $\dot{\theta}_w$ es la velocidad angular de la llanta, r es su radio, and v_w es la velocidad del eje.

La Figura 2 muestra las principales variables cinemáticas involucradas. La velocidad v_x es la velocidad del punto medio entre las llantas. Las ruedas giran a velocidades angulares $\dot{\theta}_l$ y $\dot{\theta}_r$. Las fuerzas de tracción en las llantas se denotan con la variable F_x .

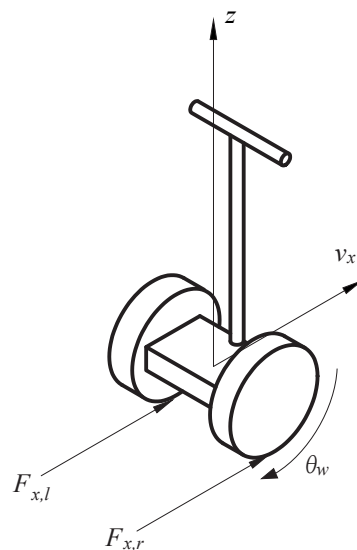


Fig. 2. Fuerzas de tracción.

B. Sistema de control

La estabilización del vehículo se efectúa por medio del método descrito en [7] el cual consiste de un controlador PD para el ángulo del péndulo y un controlador PI con acción anticipativa para la dirección.

Esto se describe mediante las siguientes relaciones:

$$T_l = K_p (\theta_p - \theta_{des}) + K_d \dot{\theta}_p - T_\beta \quad (2)$$

$$T_r = K_p (\theta_p - \theta_{des}) + K_d \dot{\theta}_p - T_\beta \quad (3)$$

$$T\beta = K_{ff} \dot{\beta}_{des} + K_{\beta p} \dot{\beta} - \dot{\beta}_{des} + K\beta_i \int_0^t (\dot{\beta} - \dot{\beta}_{des}) dt \quad (4)$$

donde K_p es la ganancia proporcional y K_d es la ganancia derivativa del controlador de inclinación. Las ganancias de acción anticipativa, proporcional e integral del control de giro son: K_{ff} , $K_{\beta p}$ y $K_{\beta i}$. La acción de control de giro está representada por T_β . Los ángulos de inclinación deseados y medidos son θ_{des} y θ_p . La razón de giro deseada es $\dot{\beta}_{des}$ y la razón de giro medida o realimentada es $\dot{\beta}$. En este estudio se analizan solamente maniobras de frenado y aceleración por lo que el comando de giro es igual a $T_l = T_r$ y todas las trayectorias simuladas son rectilíneas.

Las ganancias del controlador y los parámetros del vehículo fueron calibrados según el proceso descrito en [8] con el fin de emular la respuesta real de una Segway i2.

C. Control de tracción

C.1. Estimación de aceleración angular límite

Se puede obtener una estimación de la aceleración angular máxima permisible que puede tener la rueda del vehículo por medio de un balance de fuerzas. Considérese el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 3. La carga del vehículo se puede modelar como una fuerza vertical que actúa sobre los ejes de las ruedas y cuya magnitud es la suma del peso del vehículo y el peso de la persona. En este caso se asume que el vehículo se traslada sobre una superficie plana cuyo ángulo con la horizontal es θ_s . N es la normal entre las ruedas y la superficie de ruedo, f es la fuerza longitudinal entre las ruedas y la superficie, y τ es el torque de entrada a la rueda impartido por el motor.

El eje x se define paralelo a la superficie inclinada mientras que el eje y es perpendicular a esta. Un balance de fuerzas en ambos ejes se producen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\Sigma F_x &= (m + m_v)\alpha_x \\ f - (m + m_v)g \sin \theta_s &= (m + m_v)\alpha_x\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= 0 \\ N - (m + m_v)g \cos \theta_s &= 0\end{aligned}\quad (6)$$

La aceleración a lo largo de la superficie inclinada, a_x se puede despejar de la ecuación (5) y asumiendo

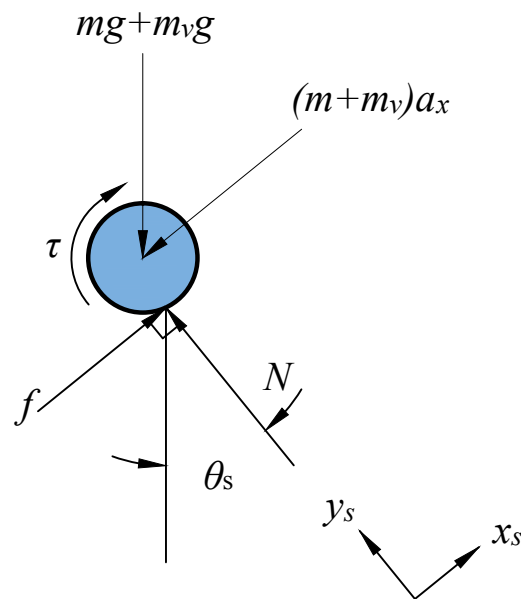


Fig. 3. Simplified analysis.

$f = \mu N$ se obtiene:

$$\alpha_x = \frac{\mu N}{m + m_v} - g \sin \theta_s \quad (7)$$

Despejando la fuerza normal de (6), sustituyendo en 7 y simplificando, se obtiene una expresión para la máxima aceleración alcanzable por el vehículo dado un ángulo de pendiente θ_s , y un coeficiente de fricción μ :

$$\alpha_{x,max} = \mu g \cos \theta_s - g \sin \theta_s \quad (8)$$

La ecuación (8) muestra que la capacidad de aceleración del vehículo depende de la pendiente de la superficie. Un control de tracción basado en un único límite de aceleración es incapaz de

considerar esta condición. Se considerará como valor de aceleración límite la aceleración a $\theta_s = 0^\circ$. Esto produce una aceleración máxima de $a_x = \mu g$. Si se asume un cociente de tracción máximo de 0.92 y un radio de 0.2415 m, la aceleración angular máxima de la rueda que puede obtenerse sin deslizamiento es:

$$\alpha_u = 37,37 \text{ rad/s}^2 \quad (9)$$

Para efectos de simulación se redondea este valor a $\alpha_u = 40 \text{ rad/s}^2$. Se establece un límite inferior como condición para deshabilitar la condición de deslizamiento en $\alpha^l = 1 \text{ rad/s}^2$.

C.2. Algoritmo de control basado en aceleración angular límite

El algoritmo de control que se propone se basa en el método establecido en la patente descrita anteriormente. Cuando la aceleración angular supera el límite superior preestablecido α_u , el torque al motor se reduce rápidamente a cero. Una vez que la aceleración angular es menor a α_l , el motor se enciende de nuevo y el torque se reestablece al valor que especifique el control de balance. La ley de control se resume en:

$$T_i = \begin{cases} T_{b,i}, & \text{if } slip_i = false \\ 0, & \text{if } Slip_i = true \end{cases} \quad (10)$$

donde $i = l, r$ para la rueda izquierda y derecha, respectivamente, $T_{b,i}$ is the torque comandado por el control de balance, y $Slip_i$ es la condición de deslizamiento].

La condición de deslizamiento se obtiene de la siguiente manera:

$$Slip_i = \begin{cases} True, & \text{if } \alpha_i > \alpha_u \\ True, & \text{if } \alpha_i > \alpha_l \text{ and } Slip_i = true \\ True, & \text{if } \alpha_i > \alpha_l \end{cases} \quad (11)$$

La señal de control obtenida del control de balance es:

$$T_{b,l} = K_p (\theta_p - \theta_{des}) + K_d \dot{\theta}_p - T_\beta \quad (12)$$

$$T_{b,r} = K_p (\theta_p - \theta_{des}) + K_d \dot{\theta}_p + T_\beta \quad (13)$$

$$T_\beta = K_{ff} \dot{\beta}_{des} + K_{\beta p} (\beta - \beta_{des}) + K_{\beta i} \int_0^t (\dot{\beta} - \dot{\beta}_{des}) dt \quad (14)$$

IV. RESULTADOS

Se simuló una maniobra de aceleración sobre una superficie de baja fricción de 0.15 m de longitud. En esta sección se presenta el desempeño del controlador para mantener al vehículo en equilibrio.

A. Desempeño del control de tracción en superficies de tracción reducida

Se simuló una superficie con un cociente de tracción máximo de 0.92 y se varió la tracción máxima desde un 10 % hasta un 50 % de este valor. En la Figura 4 se muestra el ángulo máximo alcanzado por el péndulo. Conforme más alto es este valor más inestable se considera el vehículo. En la figura se observa que la presencia del control de tracción solamente hizo diferencia para valores de un 26 % de coeficiente de fricción máximo y no en todos los casos consiguió mantener el ángulo del péndulo en un valor bajo. Incluso, para algunos casos la presencia del control de tracción hizo que el péndulo cayera más. El control de tracción solamente fue efectivo en disminuir la oscilación en superficies cuya tracción máxima disponible estaba entre un 36 % y un 40 % de la superficie de tracción máxima. En esta fase se observa una transición en el comportamiento dinámico tanto con y sin control de tracción que debe estudiarse con mayor detalle.

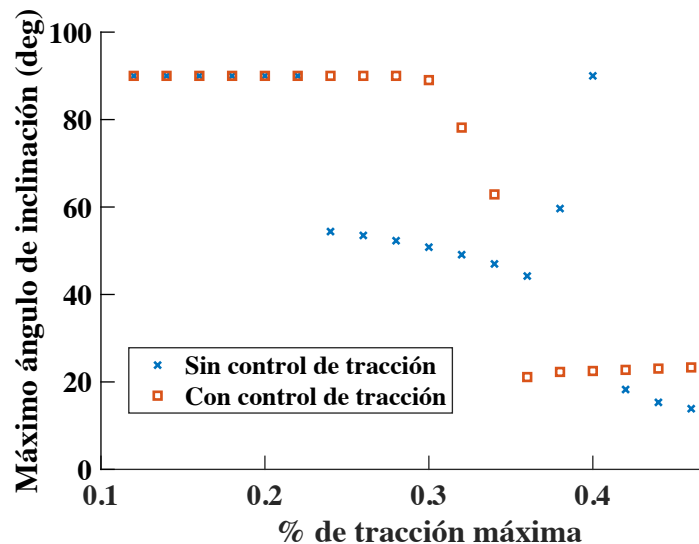


Fig. 4. Máximo ángulo del péndulo a diferentes coeficientes de fricción.

En la Figura 5 se muestra el máximo deslizamiento de la rueda para los mismos casos. Como se puede observar, el control de tracción sí es bastante efectivo en disminuir el deslizamiento entre la rueda y el suelo. Esto indica que la pérdida de balance observada en la Figura 5 no es causada por un deslizamiento excesivo necesariamente si no que el control de tracción si consigue el objetivo de disminuirlo pero lo hace sacrificando la estabilidad del vehículo. Al limitar la aceleración máxima de las ruedas, el vehículo ve comprometida su capacidad de estabilizarse. En la Figura además se observa cierta periodicidad pero se requiere refinar la simulación para identificar correctamente este comportamiento.

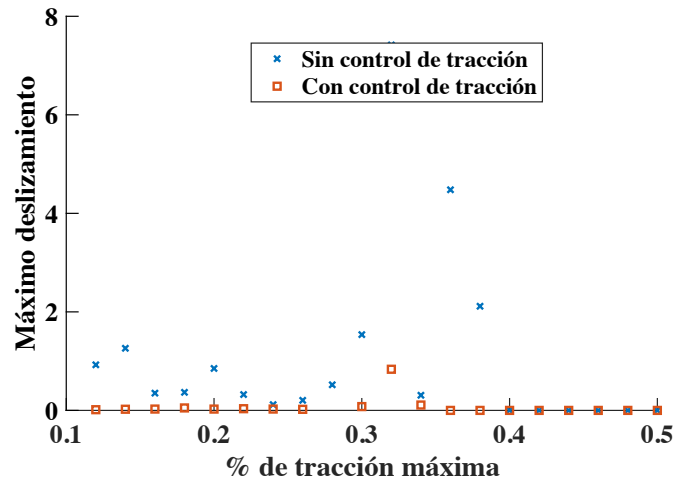


Fig. 5. Máximo deslizamiento a diferentes coeficientes de fricción.

B. Desempeño en una superficie de baja tracción

En esta sección se presenta uno de los casos donde el control de tracción consiguió mejorar la estabilidad del vehículo. La Figura 6 muestra el ángulo del péndulo con y sin control de tracción cuando la superficie de rueda tiene un 40 % del coeficiente de fricción de la superficie de tracción máxima. Nótese que el vehículo sin control de tracción cayó hasta llegar a los 90° mientras que el vehículo con control de tracción si consiguió estabilizar su ángulo al cabo de 3 segundos de simulación.

Esto es indicación de que el control de tracción presentado si puede ser efectivo en mejorar la estabilidad del vehículo en superficies de baja fricción. Sin embargo, debe considerarse las condiciones específicas en las que se activa. Por lo tanto, se requiere refinar las simulaciones aquí presentadas para identificar estas condiciones más precisamente y conseguir que el control de tracción sea adaptable a ellas.

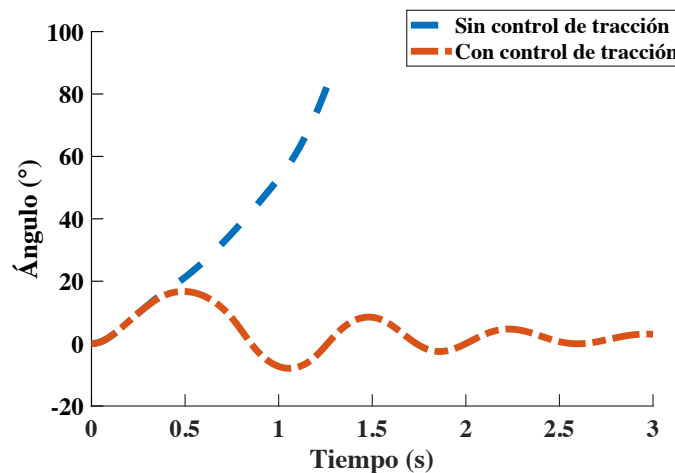


Fig. 6. Ángulo al acelerar sobre superficie de baja fricción.

CONCLUSIONES

Los resultados mostrados indican que el control de tracción basado en limitar la aceleración angular de la rueda es efectivo en reducir el deslizamiento en superficies de baja tracción. Sin embargo, excepto en algunas condiciones específicas, lo hace menoscabando la capacidad del vehículo para estabilizarse. Por lo tanto, el control de tracción presentado debe implementarse en conjunto con otras estrategias dirigidas a proteger la estabilidad del vehículo.

REFERENCIAS

- [1] K. Sorensen y W. Singhose, «Wheeled Inverted Pendulum Control and Slip Dynamics,» en *IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, IEEE, 2018, págs. 336-343.
- [2] M. J. Kim y K. Sorensen, «Comparison of Coulomb and Brush Tire Models for Characterizing Tractive Force in WIP Systems,» en *IEEE 14th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, IEEE, 2018, págs. 1107-1112.
- [3] A. C. Castro y F. B. Ramirez, «Modelo de un vehiculo de pendulo invertido de dos ruedas con traccon dinamica,» *Ingenieira: Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 33, n.o 3, págs. 115-123, 2023.
- [4] D. R. Jones y K. A. Stol, «Modelling and stability control of two-wheeled robots in low-traction environments,» en *Australasian Conference on Robotics and Automation, Brisbane, Australia*, 2010.
- [5] R. P. M. Chan, K. A. Stol y C. R. Halkyard, «Effect of limiting wheel slip on two-wheeled robots in low traction environments,» en *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Springer, 2012, págs. 417-426.
- [6] J. B. Morrell y J. B. Pompa, *Traction control for a personal transporter*, US Patent 6,408,240, jun. de 2002.
- [7] J. B. Morrell y D. Field, «Design of a Closed Loop Controller for a Two Wheeled Balancing Transporter,» en *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, oct. de 2007.
- [8] A. Castro, C. Adams y W. Singhose, «Dynamic response characteristics of a two-wheeled inverted-pendulum transporter,» en *IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control (CDC)*, IEEE, Florence, Italy, 2013, págs. 1532-1537.

Novedades en el diseño de estructuras y la inspección

Uso de marcos con riostras intencionalmente excéntricas en edificios de gran altura

Use of frames with intentionally-eccentric braces in high-rise buildings

Andrés González Ureña

Profesor, Escuela de Ingeniería Civil y Laboratorio de Ingeniería Sísmica, UCR

email: andres.gonzalezurena@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo, BIE, diseño sismorresistente, FIEB, riostras de acero.

Keywords:

BIEs, earthquake-resistant design, FIEBs, Non-Linear Response History Analysis, steel braces.

RESUMEN

Los marcos con riostras intencionalmente excéntricas (FIEB, del inglés *Frame with Intentionally- Eccentric Braces*) son un sistema sismorresistente novedoso que supera las limitaciones de los marcos arriostrados concéntricamente relacionadas con su alta rigidez elástica y su rigidez post- elástica marginal. Estudios numéricos recientes han demostrado que los FIEB ofrecen un desempeño sísmico superior y requieren menor cantidad de material que los marcos arriostrados concéntricamente en edificios bajos y de mediana altura gracias a su alta rigidez post-elástica y a que ofrecen un mejor control de la sobrerresistencia. Otra ventaja supuesta de los FIEB es que la estabilidad dinámica de los edificios altos podría asegurarse escogiendo las riostras de modo que la rigidez post-elástica de cada piso resulte mayor que la rigidez geométrica negativa, contrarrestando así los efectos $P-\Delta$. En esta ponencia se explora la aptitud de los FIEB para constituir el sistema sismorresistente de edificios altos. Para ello, se diseñan edificios prototipo de 40, 30 y 20 pisos que se modelan numéricamente y se someten a análisis según el método no lineal dinámico de respuesta en el tiempo. Los resultados muestran que estos edificios presentan una respuesta satisfactoria, sugiriendo que los FIEB son aptos como sistema sismorresistente en edificios altos.

ABSTRACT

Frames with Intentionally-Eccentric Braces (FIEBs) are a novel seismic-force-resisting system that overcomes the limitations of concentrically braced frames related to their high elastic stiffness and marginal post-elastic stiffness. Recent studies have shown that FIEBs offer an improved seismic performance and require less material than concentrically braced frames in low- and mid-rise buildings owing to their high post-elastic stiffness and to a better control over the overstrength. Another presumed advantage of FIEBs is that the dynamic stability of tall buildings could be ensured by selecting the braces so that the post-elastic stiffness of each storey be greater than the negative geometric stiffness, thus counteracting $P-\Delta$. In this presentation, the aptness of FIEBs for use as the seismic-force-resisting system of tall buildings is explored. To this effect, 40-, 30- and 20-storey prototype buildings are designed and modelled numerically and subjected

to Non-Linear Response History Analysis. The results show that these buildings respond satisfactorily to earthquake loading, suggesting that FIEBs are adequate as the seismic- force-resisting system of tall buildings.

I. INTRODUCCIÓN

Las riostras con excentricidad intencional (BIE, del inglés *Brace with Intentional Eccentricity*) surgen como una alternativa a las riostras cargadas concéntricamente (CLB, del inglés *concentrically loaded braces*) tradicionales con un desempeño estructural mejorado [1]. Dado el desfase entre el eje del cuerpo de la riostra y la línea de acción de las fuerzas, la fuerza axial en las BIE se acompaña de flexión, lo que implica que su rigidez elástica sea inherentemente menor que la de una CLB con igual sección transversal. Adicionalmente, una vez que se alcanza el esfuerzo de cedencia en la fibra extrema de la BIE, la plastificación progresa gradualmente a través de la sección, lo que resulta en una rigidez post-elástica considerable que contrasta con la casi nula rigidez plástica de una CLB. Para una descripción exhaustiva de la respuesta de las BIE a carga monotónica y cíclica y de la influencia de las variables involucradas se sugiere al lector referirse a [2] y [3].

Al utilizarse en FIEB, dichas características de las BIE se traducen en ventajas sobre los marcos arriostrados concéntricamente (CBF, del inglés *concentrically braced frame*). La menor rigidez de las BIE produce estructuras con mayor período fundamental, sujetas por lo tanto a aceleraciones espectrales y fuerzas sísmicas de diseño menores. Además, la posibilidad de ajustar la rigidez elástica y post-elástica de cada nivel variando la excentricidad permite un mayor control sobre la respuesta dinámica de la estructura y una reducción de la sobrerresistencia incidental. En conjunto, estas características contribuyen a reducir el costo de la estructura y resultan en que los FIEB se presten especialmente bien para el diseño orientado hacia el desempeño, ya que el cumplimiento de objetivos de desempeño asociados con distintos niveles de amenaza sísmica puede asegurarse fácilmente a través del diseño [3] [5].

Otra ventaja presunta de los FIEB es que la rigidez post-elástica sustancial de las BIE permitiría su empleo en edificios de gran altura al asegurar la estabilidad estructural contrarrestando los efectos P- La hipótesis es que, seleccionando en cada nivel riostras con rigidez lateral mínima mayor que la rigidez geométrica negativa, puede prevenirse que los desplazamientos de la estructura excedan el umbral de equilibrio estable. Debido a la dificultad en los CBF de controlar las demandas de deriva inelástica, dada su limitada rigidez post-elástica y el riesgo de inestabilidad que ello conlleva, la mayoría de los códigos de diseño vigentes limitan su altura máxima. Por ejemplo, la norma CSA S16-19 establece una altura máxima de 60 m para los CBF construidos en regiones con amenaza sísmica moderada o alta [6].

En esta ponencia se estudia la aptitud de los FIEB con BIE con sección estructural hueca (HSS, del inglés *hollow structural section*) rectangular. Para ello, se diseñan edificios hipotéticos de 40, 30 y 20 pisos situados en Vancouver, Colombia Británica (Canadá), utilizando una adaptación del procedimiento de diseño descrito en [4] y se comprueba su desempeño sísmico sometiendo modelos numéricos de estos a análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo con la herramienta OpenSees [7].

II. MÉTODO DE DISEÑO

El método empleado en este estudio para el diseño de edificios altos con FIEB es una adaptación del método presentado y detallado por el autor en [3] y [4]. En los párrafos siguientes se describen los cambios que se implementaron con respecto a la versión anterior de dicho método para su aplicación a edificios de gran altura.

En estudios anteriores, los parámetros de la respuesta de fuerza-desplazamiento de las BIE se obtenían considerando modelos distintos para las riostras en tensión y en compresión. El comportamiento de la riostra en tensión se aproximaba mediante una función bilineal simplificada, mientras que se asumía una respuesta elastoplástica de la riostra en compresión. Para el presente estudio se implementaron ciertos ajustes para estimar mejor la rigidez efectiva desarrollada por el par de BIE. Las curvas simplificadas de respuesta para el diseño empleadas aquí se basan en la respuesta combinada ante carga monótonica de pares de BIE en términos de cortante de piso contra desplazamiento lateral, obtenidas de modelos numéricos en OpenSees. Adicionalmente, la curva simplificada es cuatrilínea en vez de bilineal, lo que permite aproximar en forma más precisa la rigidez efectiva del par de BIE en función del desplazamiento. La curva de fuerza-desplazamiento y la curva simplificada para diseño de un par de BIE con sección HSS 254×254×16 CSA G40.21-350W con una excentricidad de 250 mm, diseñadas para un vano arriostrado de 6 m de ancho por 4 m de alto, se presenta en la Fig.1.

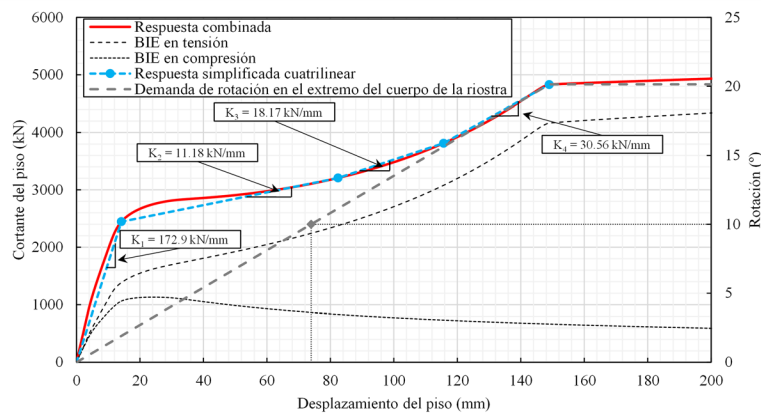


Fig. 1. Ejemplo de la respuesta de un par de BIE bajo carga monótonica y curva simplificada de diseño.

En versiones previas del método de diseño, los efectos $P-\Delta$ se incorporaban aumentando los cortantes de diseño en cada nivel por el factor U_2 , como lo permite la norma CSA S16-19 cuando se emplea análisis estático. Si bien el uso del factor U_2 produce resultados adecuados en la mayoría de los casos, ya que procura que la estructura cuente con resistencia suficiente para hacerle frente al incremento en la demanda de fuerza debida a los efectos de estabilidad, no considera explícitamente la posibilidad de colapso debido a grandes demandas de deriva cuando la rigidez lateral efectiva de un piso se vuelve negativa. Entonces, en el caso de edificios altos para los que los efectos $P-\Delta$ se incorporaban y las demandas espectrales de desplazamiento son grandes debido a su alto período fundamental, el factor U_2 es insuficiente para garantizar la estabilidad de la estructura, sobre todo si la amenaza sísmica incluye sismos de subducción de larga duración. Por lo tanto, el método de diseño

aquí empleado prescinde del factor U_2 y en su lugar requiere que las BIE en cada nivel se elijan de modo que su rigidez mínima sea superior en magnitud a la rigidez geométrica negativa del nivel.

Resultados experimentales [1, 2] han mostrado que bajo carga cíclica las BIE pueden fallar según dos mecanismos: fractura por fatiga de bajo ciclaje en su región central posterior al desarrollo de pandeo local, y fractura de tensión en el extremo del cuerpo de la riostra. En las BIE, la ocurrencia del primer modo de falla se ve postergada en comparación con las CLB debido a una mejor distribución de las demandas de deformación a lo largo del cuerpo de la riostra por efecto de la flexión inducida por la excentricidad. En el método de diseño aquí empleado se utiliza la ecuación propuesta por el autor en [8] para estimar la razón de deriva máxima admisible para las BIE en función de su geometría considerando este modo de falla. La fractura en tensión en extremo del cuerpo de la riostra está relacionada con la concentración de demanda de deformación en la región donde el cuerpo de la riostra se conecta con el ensamble *excentrador*, el componente de las BIE encargado de introducir la excentricidad y vincular rígidamente al cuerpo de la riostra con su conexión al resto del marco. Según se explica en [2], se estima que este modo de falla puede ocurrir cuando la rotación en el extremo del cuerpo de la riostra alcanza 10° .

Por lo tanto, al método de diseño se le añade el requisito de comprobar que dicho umbral de rotación no se alcance al actuar sobre la estructura el sismo de diseño. Por ejemplo, en el caso de las BIE cuya respuesta se muestra en la Fig.1, la rotación de 10° en la región crítica se alcanza a un desplazamiento de piso de 73 mm, equivalente a una razón de deriva de 1.8%, bajo carga monótonica. Bajo carga cíclica, la rotación de 10° se alcanzaría a desplazamientos mucho mayores, pero para fines de este estudio se asume conservadoramente un límite de desplazamiento bajo carga sísmica 50% mayor que el desplazamiento que produce una rotación de 10° en la región crítica bajo carga monótonica.

III. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE FIEB DE GRAN ALTURA

Para evaluar el desempeño de FIEB diseñados con el método descrito como sistema sismorresistente de edificios altos, se diseñaron tres edificios con planta idéntica en versiones de 20, 30 y 40 pisos de altura para posteriormente someterlos a análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo. Se seleccionó a la ciudad de Vancouver, en Colombia Británica (Canadá) como emplazamiento de los edificios por su alta amenaza sísmica, la cual incluye sismos de subducción interplaca e intraplaca y corticales. Se supuso que el suelo en el sitio tiene una velocidad promedio de onda cortante de 360 m/s y el espectro de aceleración de diseño se obtuvo según la referencia [9]. Los miembros de acero estructural se diseñaron según [6]. La configuración de la planta y las cargas gravitacionales consideradas en el diseño se muestran en la Fig. 2 y la configuración típica de los marcos arriostrados se presenta en la Fig. 3.

Se crearon modelos de elementos finitos en OpenSees para los FIEB utilizando secciones de fibras para las BIE, vigas y columnas. Los ensambles *excentradores* y la región de rótula de las placas cuchilla se modelaron explícitamente con secciones de fibras mientras que el resto de la conexión se modeló como vínculos rígidos. La masa de cada nivel se especificó concentrada en el nodo central y se asignaron diafragmas rígidos. Los efectos P- Δ se incorporaron utilizando una columna adosada al FIEB a la que se asignaron las cargas gravitacionales concomitantes correspondientes al

área tributaria respectiva. Se consideró amortiguamiento de Rayleigh de 3% del amortiguamiento crítico. Los registros sísmicos utilizados para el análisis se seleccionaron y ajustaron siguiendo los lineamientos de [10]. Se emplearon dos conjuntos de registros sísmicos representando escenarios específicos, según se desprende de la desagregación de la amenaza sísmica para Vancouver descrita en [11]: se utilizó un conjunto de 11 registros correspondientes a sismos corticales y por subducción intraplaca ajustados para cubrir los períodos entre 0.6 y 1.0 s y otro conjunto compuesto por 11 registros de sismos de subducción interplaca ajustados para cubrir el espectro objetivo entre 1.0 y 10.0 s. Los parámetros de diseño y propiedades de los tres primeros modos de los FIEB diseñados se presentan en el CUADRO I, donde T representa el período y RMP la razón de masa participativa acumulada.

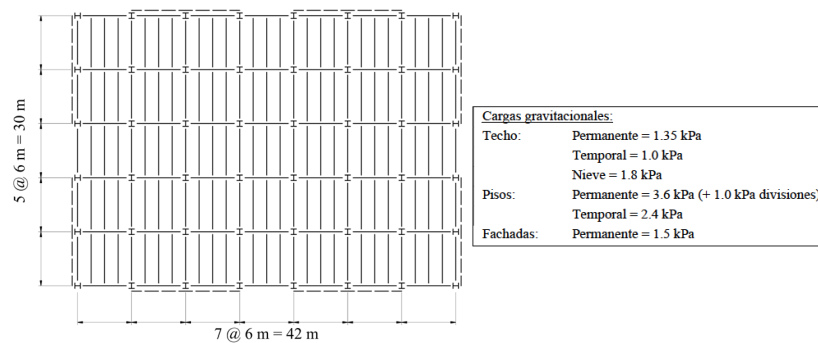


Fig. 2. Planta de los edificios y cargas gravitacionales de diseño.

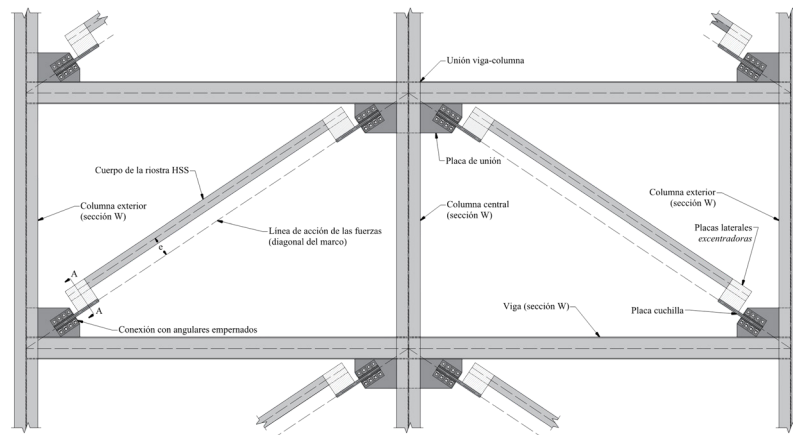


Fig. 3. Configuración típica de los FIEB.

CUADRO I.
PARÁMETROS DE DISEÑO Y PROPIEDADES MODALES DE LOS FIEB.

Número de pisos	Deriva objetivo	Peso (t)	HSS de las BIE	Rango de excentricidades (mm)	1 ^{er} modo		2 ^{do} modo		3 ^{er} modo	
					T (s)	RMP	T (s)	RMP	T (s)	RMP
40	1.80%	494	254×254×16	180 - 460	7.44	0.636	2.39	0.837	1.30	0.902
30	2.10%	273	254×254×16	220 - 460	5.53	0.667	1.85	0.857	1.02	0.915
20		104	178×178×16	200 - 360	4.32	0.704	1.51	0.878	0.85	0.929

IV. RESULTADOS

Las razones de deriva máximas obtenidas para los 3 edificios se presentan en la Fig. 4. No se observaron colapsos ni concentración de derivas en pisos particulares, lo que refleja la eficacia del procedimiento de diseño en garantizar la estabilidad. Como se esperaba, los registros sísmicos de subducción interplaca produjeron las mayores derivas en todos los casos. Las mayores derivas se producen en el tercio superior de los edificios y el contraste entre los pisos superiores e inferiores se acrecienta con la altura del FIEB. Esto es debido a los efectos de los modos superiores, cuya influencia relativa aumenta con la altura de la estructura. En el caso del edificio de 20 pisos, las derivas máximas promedio son inferiores que el objetivo. Para el edificio de 30 pisos, las derivas máximas promedio de los sismos de subducción exceden estrechamente el objetivo en 4 niveles, pero se mantienen por debajo del límite admisible de 2.5%. Para el edificio de 40 pisos, las derivas máximas exceden el objetivo entre los niveles 27 y 39 e incluso superan por poco el límite de 2.5% en 3 pisos. Sin embargo, a excepción de para un único registro de subducción interplaca, no se excede el umbral asociado con la posible falla por fractura en tensión en el extremo del cuerpo de la riostra. Adicionalmente, se revisaron también las razones de deriva residuales y los cortantes desarrollados en cada piso. Se encontró que las derivas residuales son en todos los casos inferiores a 0.5%, lo que indica daño relativamente bajo y reparable [12], y que los cortantes promedio no superaron las fuerzas por capacidad consideradas en diseño.

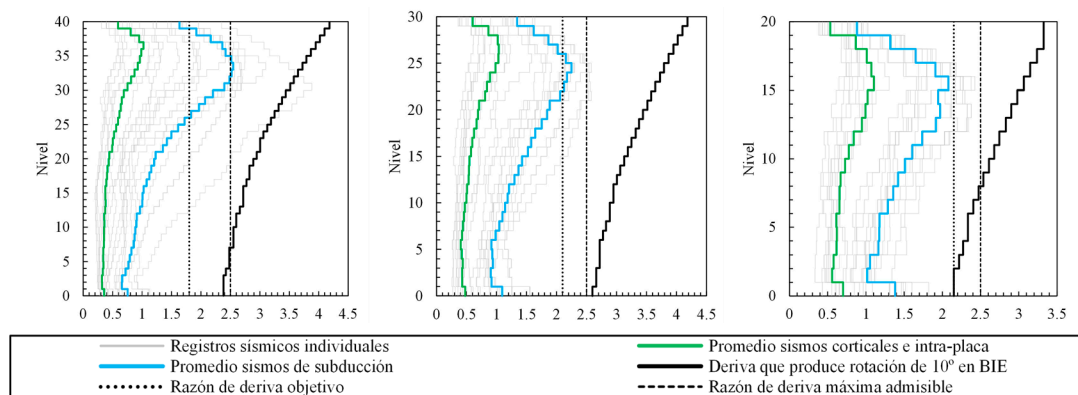


Fig. 4. Razón de deriva máxima para FIEB de 40 (a), 30 (b) y 20 pisos (c).

CONCLUSIONES

La aplicabilidad de los FIEB como sistema sismorresistente de edificios altos se investigó a través del diseño de edificios de 40, 30 y 20 pisos, localizados en un sitio con amenaza sísmica alta, y su subsecuente análisis mediante el método no lineal dinámico de respuesta en el tiempo. Estos edificios mostraron una respuesta satisfactoria a las sacudidas sísmicas, desarrollando derivas máximas moderadas y presentando derivas residuales bajas. Los resultados indican que la rigidez post-elástica de las BIE puede aprovecharse para contrarrestar los efectos P- Δ , asegurando así la estabilidad de en edificios altos. No obstante, el procedimiento de diseño empleado no logra

considerar adecuadamente los efectos de modos superiores, lo que resulta en razones de deriva máximas superiores al objetivo para los edificios más altos y señala su necesidad de ser revisado y adaptado.

REFERENCIAS

- [1] K. A. Skalomenos, H. Inamasu, H. Shimada, y M. Nakashima, “Development of a Steel Brace With Intencional Eccentricity and Experimental Validation” *Journal of Structural Engineering*, vol. 143, no. 8, Ago. 2017, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001809.
- [2] A. González Ureña, R. Tremblay, y C. A. Rogers, “Experimental and numerical study of square HSS BIEs under cyclic loading”, *Eng Struct*, vol. 252, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113669.
- [3] A. González Ureña, R. Tremblay, y C.A. Rogers, “Earthquake-resistant design of steel frames with intentionally eccentric braces”, *J Constr Steel Res*, vol. 178, Mar. 2021, doi:10.1016/j.jcsr.2020.106483.
- [4] A. González Ureña, R. Tremblay, y C.A. Rogers, “Design and performance of Frames with Intentionally Eccentric Braces”, en *17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, Japón, 2020.
- [5] K. Skalomenos, T. Whittall, M. Kurata, y J. Pickering. “Component testing and multi-level seismic design of steel braced frames with high post-yielding stiffness and two-phase yielding”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 157, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107248.
- [6] Canadian Standards Association - CSA, “CSA S16:19, Design of Steel Structures” . Toronto, ON 2019.
- [7] F. McKenna, M. H. Scott, y G.L. Fenves, “Nonlinear Finite -Element Analysis Software Architecture Using Object Composition”. Doi: 10.1061/ASCECP.1943-5487.0000002.
- [8] A. González Ureña, R. Tremblay, y C.A. Rogers, “Numerical investigation of the seismic response of square HSS Braces with Intencional Eccentricity” en *17th World Conference on Earthquake Engineering*, Sendai, 2020.
- [9] Canadian Commission on Building and Fire Codes, *National Building Code of Canada 2020*. Ottawa, 2020.
- [10] Canadian Commission on Building and Fire Codes, *Structural Commentaries (Users Guide - NBC 2015: Part 4 of Division B)*. Ottawa, 2017.
- [11] S. Halchuk, J. Adams, M. Kolaj, y T. Allen “Deaggregation of NBCC 2015 Seismic Hazard for Selected Canadian Cities”, en *12th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Québec, QC, Canada.
- [12] J. McCormick, H. Aburano, M. Ikenaga, y M. Nakashima, “Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements” *Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 2008.

Correlaciones entre medidas de intensidad sísmica y parámetros de demanda de ingeniería: Un caso para Costa Rica

Correlations between seismic intensity measurements and engineering demand parameters: A case for Costa Rica

Diego A. Hidalgo

*Coordinador, Laboratorio de Ingeniería Sísmica, UCR
e-mail: diego.hidalgo@ucr.ac.cr*

Luis A. Pinzón

*Investigador, Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología,
Universidad Santa María la Antigua
e-mail: lpinzon@usma.ac.pa*

Miguel A. Mánica

*Investigador, Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México
e-mail: MManicaM@iingen.unam.mx*

Rodrigo E. Alva

*Investigador, Universidad Politécnica de Cataluña
e-mail: rodrigo.esteban.alva@upc.edu*

Palabras clave:

Análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo, evaluación de daños, medidas de intensidad sísmica, parámetros de demanda de ingeniería, correlación.

Keywords:

Damage assessment, engineering demand parameters, nonlinear time history analysis, seismic intensity measures, correlation.

RESUMEN

En este artículo se evaluaron las correlaciones entre diferentes medidas de intensidad sísmica (IM) y parámetros de demanda estructural (EDP), obtenidos a través de análisis dinámicos no lineales (NLDA). Se utilizó la base de datos de movimientos fuertes de Costa Rica y un edificio de marcos de concreto reforzado con 10 niveles para desarrollar el estudio. Se obtuvieron estimaciones de IMs tradicionales a partir de los movimientos del suelo y también mediante la respuesta de un oscilador de un grado de libertad (SDFO) correspondiente al período fundamental del edificio. Se realizaron NLDA utilizando registros no escalados y escalados, y se estimaron dos EDP: la razón de desplazamiento promedio entre pisos (AIDR) y la razón

de desplazamiento máximo entre pisos (MIDR). Los resultados demuestran una mejora en las correlaciones al utilizar IM basados en la respuesta lineal de un oscilador SDFO. Las IM basadas en velocidad como *PGV* y *SV* presenta altas correlaciones. Esto puede ser una gran ventaja al representar el daño sísmico potencial, tanto para la toma de decisiones inmediatas como para la evaluación del peligro sísmico de una región.

ABSTRACT

In this article, the correlations between different seismic intensity measures (IM) and structural demand parameters (EDP), obtained through nonlinear dynamic analysis (NLDA), were evaluated. The strong motion database of Costa Rica and a 10-story reinforced concrete frame building were used to develop the study. Estimates of traditional IMs were obtained from ground motion records and also through the response of a single-degree-of-freedom oscillator (SDFO) corresponding to the fundamental period of the building. NLDA was performed using both unscaled and scaled records, and two EDPs were estimated: the average inter-story drift ratio (AIDR) and the maximum inter-story drift ratio (MIDR). The results demonstrate an improvement in correlations when using IMs based on the linear response of an SDFO oscillator. IMs based on velocity such as *PGV* and *SV* show high correlations. This can be a significant advantage in representing potential seismic damage, both for immediate decision-making and for seismic hazard assessment in a region.

I. INTRODUCCIÓN

Las medidas de intensidad sísmica (IM por sus siglas en inglés), son utilizadas para caracterizar los posibles efectos de los sismos en estructuras. La respuesta espectral en aceleración ha sido históricamente empleada para el estudio de la amenaza sísmica y el riesgo asociado en estructuras así como para el diseño de estructuras ante sismos [1]. Esta IM emplea la respuesta elástica de osciladores de un grado de libertad (SDFO por sus siglas en inglés) ante registros de aceleración, sin tomar en cuenta la respuesta específica de las estructuras. Para poder evaluar el desempeño de las estructuras ante las acciones sísmicas, se deben emplear los parámetros de demanda estructural o EDP por sus siglas en inglés, los cuales relacionan la respuesta de las estructuras debido a registros sísmicos. Las EDP son empleadas para verificar el desempeño de las estructuras ante diferentes niveles de la acción sísmica y así determinar el nivel de daño esperado para eventos sísmicos en particular.

Existe una correlación entre las IM y las EDP, la cual depende de las características de las señales sísmicas y de las estructuras analizadas [2], [3], sin embargo, dicha correlación es compleja ya que la respuesta de las estructuras depende de muchos factores, como los criterios de diseño, características de los materiales, niveles mínimos de diseño, entre otros. Una alta correlación entre las medidas estimadas con las señales sísmicas y medidas de respuesta estructural es altamente deseada para la estimación de daño en estructuras existentes, así como para la asignación o prescripción de cargas de diseño sísmico en nuevas edificaciones.

Con el objetivo de identificar la correlación entre diferentes IM y EDP, se plantea en esta investigación el uso de señales sísmicas de aceleración obtenidas para sismos en Costa Rica así como el uso de una estructura de marcos de concreto reforzado de 10 niveles, la cual fue diseñada de acuerdo con la norma sismo resistente vigente en el país [4]. Se realiza la estimación de IM

de manera tradicional, y se realiza una propuesta de modificación para algunas medidas de intensidad, donde en lugar de emplear la señal sísmica con el movimiento del suelo, se emplea la historia de respuesta de SDFO con periodo fundamental igual al del edificio bajo estudio. El análisis de EDP se realiza con el método de análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo (NLDA por sus siglas en inglés) empleando un modelo bidimensional en el programa de análisis Ruaumoko [5].

II. BASE DE DATOS DE SISMOS

El Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) es el único centro de investigación que posee una base de datos con registros de aceleración para Costa Rica. Dicha base de datos posee registros digitales de sismos que han ocurrido desde 1998 hasta el 2022. En el presente estudio se usó la versión 2022 de la base de datos, la cual incluye 4199 registros triaxiales provenientes de 491 sismos, registrados hasta diciembre del 2021. Todos los registros poseen la misma tasa de muestreo (200 muestras por segundo) y han sido procesados de acuerdo con lo descrito por Moya-Fernández et al. [6]. Esta base de datos ha sido empleada para estudios de amenaza sísmica en Costa Rica [7], para lo cual se realizó una caracterización de la velocidad de onda de corte media en los primeros 30 metros de suelo (V_{s30}) en 52 estaciones, con lo cual se actualizó la clasificación de suelos de la red acelerográfica del LIS [8]. La base de datos posee un sesgo, como la mayoría de las bases de datos de este tipo, al contar con gran cantidad de eventos de moderada a baja magnitud e intensidad y solo unos cuantos eventos de gran magnitud y registros de alta intensidad.

III. MEDIDAS DE INTENSIDAD SÍSMICA (IM)

Las medidas de intensidad sísmica buscan modelar de manera simplificada el efecto de los sismos, así como el potencial de daño sobre las estructuras. Las IM son empleadas en estudios de amenaza y riesgo sísmico, así como en las normas de diseño de manera prescriptiva para la definición de la sollicitud sísmica esperada en las edificaciones. Las primeras medidas de intensidad fueron definidas de la lectura directa de los registros de aceleración, como la aceleración máxima del terreno (PGA por sus siglas en inglés), o derivadas del tratamiento directo de las señales, como la intensidad de Arias [9], la cual emplea la integral del registro de aceleraciones al cuadrado para su estimación. Posteriormente, con el avance de los sistemas informáticos se popularizó el uso de IM basadas en la respuesta espectral, las cuales conllevan una solución numérica de un conjunto de ecuaciones diferenciales para poder definir la respuesta de SDFO. En el CUADRO I se muestran las MI que serán calculadas empleando la base de registros de aceleración del LIS.

CUADRO I.
MEDIDAS DE INTENSIDAD SÍSMICA BASADAS EN SEÑALES DE ACELERACIÓN
($T = 0$ s) Y EN LA RESPUESTA AMORTIGUADA ($\xi = 5\%$) DE UN OSCILADOR CON
EL PERIODO NATURAL (T_I) DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA.

Definición	IM – registro sísmico ($T = 0$ s)	IM – SDFO con T_I	Unidades
Aceleración máxima	$PGA = \max \alpha(t) $	$SA = \max \ddot{a}(t) $	cm/s^2
Velocidad máxima	$PGV = \max v(t) $	$SV = \max \dot{v}(t) $	cm/s
Raíz cuadrática media de la aceleración [10], [11]	$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} a(t)^2 dt}$	$\ddot{a}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} \ddot{a}(t)^2 dt}$	g
Raíz cuadrática media de la velocidad [12]	$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} v(t)^2 dt}$	$\dot{v}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\Delta} \int_{t_{5\%}}^{t_{95\%}} \dot{v}(t)^2 dt}$	cm/s
Intensidad de Arias [9]	$AI = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a(t)^2 dt$	$AI_R = \frac{\pi}{2g} \int_0^t \ddot{a}(t)^2 dt$	cm/s
Intensidad Característica [13]	$CI = acc_{rms}^{1.5} \sqrt{\Delta}$	$CI_R = RA_{rms}^{1.5} \sqrt{\Delta}$	—
Densidad específica de energía [14], [15]	$SED = \int_0^t v(t)^2 dt$	$SED_R = \int_0^t \dot{v}(t)^2 dt$	cm^2/s
Velocidad acumulativa absoluta [16]	$CAV = \int_0^t a(t) dt$	$CAV_R = \int_0^t \ddot{a}(t) dt$	cm/s
Duración significativa y velocidad máxima [2]	$I_{A-PGV} = PGV^\alpha \Delta^\beta$	$I_{A-SV} = SV^\alpha \Delta^\beta$	—

* Δ representa la duración significativa entre el 5% ($t_{5\%}$) y el 95% ($t_{95\%}$) de la intensidad de Arias; t es la duración total del registro; $a(t)$ y $v(t)$ representan los registros de aceleración y velocidad respectivamente; $\ddot{a}(t)$ y $\dot{v}(t)$ representan la respuesta del SDFO en aceleración absoluta y velocidad relativa respectivamente

IV. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA ESTUDIADA

Para la estimación de los parámetros de demanda sísmica, se ha diseñado un edificio de marcos de concreto reforzado de 10 niveles siguiendo los lineamientos de la norma sismo resistente vigente en Costa Rica [4]. El edificio se ubicó en una zona sísmica III (valle central) y un estrato de suelo S3 (suelo blando, $180 \text{ m/s} < V_{s_{30}} < 350 \text{ m/s}$). La planta del edificio cuenta con 3 vanos de 6 metros en las dos direcciones ortogonales y la separación entre pisos es de 3 metros con excepción del primer nivel que se emplea 3.5 metros. Todos los niveles, incluyendo la azotea, poseen diafragma rígido. Al ser una estructura regular tanto en planta como en altura y considerando una ductilidad local óptima (marco especial de momento), se emplea una ductilidad global de diseño (μ) de 6.0. Para el diseño se emplea concreto de resistencia nominal a la compresión ($f'c$) de 28 MPa y el refuerzo, tanto longitudinal como transversal, se considera que tiene un esfuerzo de fluencia de 420 MPa.

Como resultado del diseño, se emplean columnas de 65x65cm con 16 varillas #6 como refuerzo longitudinal y aros en zona de confinamiento de varilla #3 a cada 10cm. Las vigas de entrepiso corresponden a vigas de carga y posee un peralte de 70cm y un ancho de 30cm y se emplean 3 varillas #9 como acero longitudinal negativo y 2#8 como acero positivo con aros #3 cada 10cm. El periodo fundamental del primer modo (T_1) es de 1.302 segundo y le corresponde un 82% de la masa participativa. El diseño se realiza con el método de respuesta espectral con superposición modal, según lo prescrito en la normativa de Costa Rica [4]. Se realiza una verificación del comportamiento no lineal determinando la curva de capacidad, la cual se obtiene con un análisis de empuje incremental tipo “Pushover”. Para este análisis se emplea la distribución de desplazamientos del primer modo para la asignación de cargas laterales. En la Fig. 1 se muestra dicha curva de capacidad y además se señalan dos estados discreto de daño de acuerdo a la definición dada por el proyecto Risk-UE [17]. El estado de daño Severo (ds3) se emplea como punto de referencia para determinar los parámetros de demanda (definidos en la siguiente sección) pues se considera que ya existe una incursión importante en el rango no-lineal, pero se evita tener las grandes dispersiones observadas en estados de daño más avanzados como el Último (ds4) [18], [19].

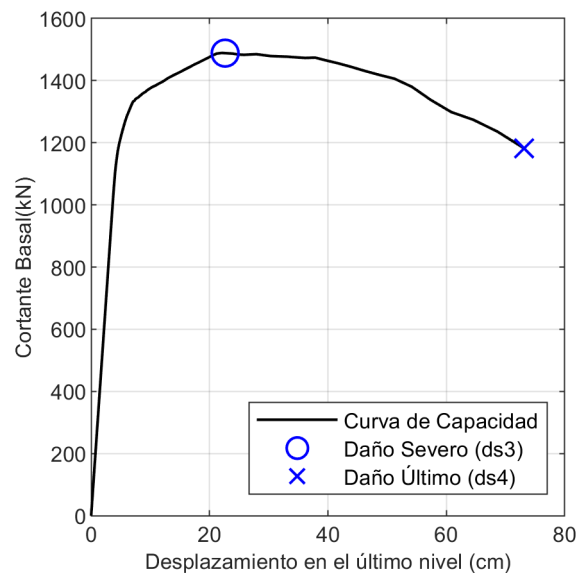


Fig.1. Curva de capacidad obtenida de un análisis Pushover para el edificio de marcos de concreto reforzado de 10 niveles. Se señalan dos estados discretos de daño: Severo (ds3) y Último (ds4).

V. PARÁMETROS DE RESPUESTA ESTRUCTURAL (EDP)

Las EDPs se determinan con los resultados de un análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo (NLDA). En específico, se estiman dos medidas de intensidad sísmica, la razón de desplazamiento máximo entre pisos (MIDR) y la razón de desplazamiento promedio entre pisos (AIDR). Estas dos EDP son altamente correlacionables con el daño tanto en elementos estructurales como no estructurales. EL NLDA fue realizado en modelos de marcos de dos dimensiones (2D) en el

programa Ruaumoko [30]. Se considera que los edificios actúan como marcos rígidos de momento. Las conexiones viga-columna se modelan como unión rígida sin considera el efecto panel ni la interacción suelo-estructura. Además, se emplea el modelo de amortiguamiento de Rayleigh con un valor del 5% del amortiguamiento crítico fijado en los modos 1 and 3 [20].

Los elementos estructurales se modelan como elementos tipo barra con plasticidad concentrada en los extremos. Se utilizan elementos de dos nodos [20]. El comportamiento no-lineal fue considerado con el modelo de una componente de Giberson [21], y la histéresis en las rótulas plásticas fue modelado con una curva Bilineal con degradación de la rigidez post-elástica [20]. Las superficies de fluencia y las curvas de Momento-curvatura fueron calculadas empleando la resistencia esperada de los materiales. Para el concreto reforzado, se emplea el modelo de Mander-Priestley [22]. La rigidez efectiva elástica fue estimada con las recomendaciones del ASCE-41 [23].

A. Selección de registros para el NLDA

Inicialmente se realiza un análisis de la estructura con registros de la base de datos del LIS [6] sin aplicar ninguna corrección o escalado, por lo que se realizaron 8398 NLDA. Los resultados muestran un sesgo importante debido a la gran cantidad de registros de baja intensidad, por lo que se realiza un proceso de selección y escalado que permite poseer una distribución uniforme de la aceleración espectral para el periodo fundamental del edificio. Para esto, se realizó una selección de 1000 registros, considerando como posibles candidatos los 8398 registros iniciales, definiendo 10 cajones en los cuales se ubicarán 100 registros en cada uno, con niveles de aceleración desde 0 hasta 1000 cm/s^2 . Se condiciona la selección a que un mismo registro no puede ser empleado más de dos veces para evitar un sesgo por falta de diversidad. Es importante resaltar que la respuesta de las estructuras no tendrá una distribución uniforme, pues al existir fenómenos no lineales entran en juego otros factores como el tipo de mecanismo, duración, contenido de frecuencias, entre otros. Los resultados mostrados a continuación emplean únicamente los resultados de los 1000 NLDA con registros escalados.

VI. CORRELACIÓN IM-EDP

Se realiza un análisis masivo del comportamiento de la estructura con los 1000 registros escalados que fueron seleccionados. Además, en paralelo se realiza la estimación de las IM tanto para el SDFO con un periodo de cero, como para el oscilador con un periodo igual al de la estructura analizada. Se emplean tres modelos de correlación: Pearson, Spearman y un polinomio de orden 2, todas condicionadas al origen (0,0).

Se obtiene que, para el edificio de 10 niveles, las IMs con mayores coeficientes de correlación son: PGV , v_{rms} , SED , $I_{D-PGV, SA}$, SV e I_{D-SV} . Se observa en el CUADRO II, como al emplear las IM definidas con el oscilador con periodo igual al de la estructura, se mejoran las correlaciones en términos generales respecto al SDFO con periodo de cero.

CUADRO II.
CORRELACIÓN ENTRE IM y EDP PARA EDIFICIO DE 10 NIVELES.

EDP	Modelo de Correlación	PGA	PGV	a_{rms}	v_{rms}	AI	IC	SED	CAV	$ID-PGV$
MIDR	Pearson	0,585	0,827	0,658	0,821	0,605	0,582	0,751	0,797	0,814
	Spearman	0,725	0,882	0,808	0,877	0,827	0,833	0,883	0,849	0,903
	Polinomio 2°	0,724	0,874	0,786	0,862	0,814	0,802	0,874	0,834	0,897
AIDR	Pearson	0,543	0,787	0,659	0,825	0,584	0,597	0,741	0,799	0,774
	Spearman	0,719	0,872	0,806	0,879	0,825	0,834	0,881	0,852	0,894
	Polinomio 2°	0,711	0,85	0,786	0,865	0,809	0,808	0,87	0,837	0,877
EDP	Modelo de Correlación	SA	SV	RA_{rms}	RV_{rms}	AI_R	IC_R	SED_R	CAV_R	$ID-SV$
MIDR	Pearson	0,858	0,868	0,746	0,756	0,646	0,675	0,655	0,702	0,784
	Spearman	0,913	0,92	0,839	0,851	0,852	0,831	0,87	0,795	0,913
	Polinomio 2°	0,895	0,903	0,821	0,83	0,833	0,812	0,848	0,771	0,892
AIDR	Pearson	0,854	0,859	0,749	0,76	0,645	0,678	0,657	0,7	0,776
	Spearman	0,91	0,915	0,843	0,854	0,851	0,833	0,87	0,794	0,907
	Polinomio 2°	0,894	0,897	0,827	0,835	0,837	0,818	0,852	0,775	0,887

CONCLUSIONES

El estudio propuesto investiga la relación entre las medidas de intensidad sísmica (IM) y los parámetros de demanda de ingeniería (EDP) para un edificio de 10 niveles tipo marco de concreto reforzado. Se prueba un nuevo enfoque en el que, en lugar de utilizar las IM estimadas directamente de los registros de movimiento fuerte, se emplea un SDFO para obtener las series temporales de respuesta y estimar el valor correspondiente de la medida de intensidad equivalente. Al comparar este nuevo enfoque con el enfoque tradicional, se observó una correlación mejorada en casi todas las EDP. La SV es la medida de intensidad con coeficientes de correlación más altos. En general se puede decir que las IM basadas en la velocidad son buenos indicadores de daño.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Panamá (SENACYT) (subvención número FID 175-2022). Asimismo, fue parcialmente financiado por la Ley Nacional de Prevención de Riesgos y Emergencias N°8488 de la República de Costa Rica y la Universidad de Costa Rica a través del proyecto C3-073.

REFERENCIAS

- [1] CFIA, *Código Sísmico de Costa Rica 1974*, 1ra ed. CFIA, 1974.
- [2] L. A. Pinzón, Y. F. Vargas-Alzate, L. G. Pujades, and S. Díaz-Alvarado, “A drift-correlated ground motion intensity measure: Application to steel frame buildings,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 132, no. July 2019, 2020, doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106096.
- [3] Y. F. Vargas-Alzate and J. E. Hurtado, “Efficiency of intensity measures considering near-and far-fault ground motion records,” *Geosci.*, vol. 11, no. 6, 2021, doi: 10.3390/geosciences11060234.
- [4] CFIA, *Código Sísmico de Costa Rica 2010 (Revisión 2014)*, 5ta ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2016.
- [5] A. J. Carr, “RUAUMOKO The Maori God of Volcanoes and Earthquakes. Volume 3: User Manual for the 3-Dimensional Version,” *Ruaumoko3D*, vol. 3. University of Canterbury, Christchurch, p. 152, 2003.
- [6] A. Moya-Fernández, L. A. Pinzón, V. Schmidt-Díaz, D. A. Hidalgo-Leiva, and L. G. Pujades, “A Strong-Motion Database of Costa Rica: 20 Yr of Digital Records,” *Seismol. Res. Lett.*, Sep. 2020, doi: 10.1785/0220200036.
- [7] 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.
- [8] L. A. Pinzón, D. A. Hidalgo-Leiva, A. Moya-Fernández, V. Schmidt-Díaz, and L. G. Pujades, “Seismic site classification of the Costa Rican Strong-Motion Network based on Vs30 measurements and site fundamental period,” *Earth Sci. Res. J.*, vol. 25, no. 4, pp. 383–389, 2021, doi: <https://doi.org/10.15446/esrj.v25n4.93927>.
- [9] A. Arias, “A measure of earthquake intensity,” in *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, 1970, pp. 438–483.
- [10] G. W. Housner, “Measures of severity of earthquake ground shaking,” in *Proc. U.S. Natl. Conf. Earthquake Eng.*, 1975, pp. 25–33.
- [11] R. Dobry, I. M. Idriss, and E. Ng, “Duration characteristics of horizontal components of strong-motion earthquake records,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 68, no. 5, pp. 1487–1520, 1978.
- [12] E. Garini and G. Gazetas, “Damage potential of near-fault records: Sliding displacement against conventional ‘Intensity Measures,’” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 455–480, 2013, doi: 10.1007/s10518-012-9397-0.
- [13] Y. J. Park, A. H. S. Ang, and Y. K. Wen, “Damage-Limiting Aseismic Design of Buildings.,” *Earthq. Spectra*, vol. 3, no. 1, pp. 1–26, 1987, doi: 10.1193/1.1585416.
- [14] S. K. Sarma, “Energy flux of strong earthquakes,” *Tectonophysics*, vol. 11, no. 3, pp. 159–172, 1971.
- [15] S. K. Sarma and K. S. Yang, “An evaluation of strong motion records and a new parameter A95,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 15, pp. 119–132, 1987, doi: 10.1002/eqe.4290150109.
- [16] J. W. Reed and R. P. Kassawara, “A criterion for determining exceedance of the Operating Basis Earthquake,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 123, no. 2–3, pp. 387–396, 1990.
- [17] Z. Milutinovic and G. Trendafiloski, “Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns,” *Rep. to WP4 vulnerability Curr. Build.*, 2003.
- [18] D. A. Hidalgo-Leiva, L. G. Pujades, A. H. Barbat, Y. F. Vargas, and S. A. Díaz, “Nonlinear static and dynamic analyses of Costa Rican reinforced concrete masonry structures,” *Eng. Struct.*, vol. 234, no. February, p. 111998, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.111998.

- [19] S. A. Diaz, L. G. Pujades, A. H. Barbat, D. A. Hidalgo-Leiva, and Y. F. Vargas-Alzate, *Capacity, damage and fragility models for steel buildings: a probabilistic approach*, vol. 16, no. 3. 2018.
- [20] A. J. Carr, “RUAUMOKO—The Maori God of Volcanoes and Earthquakes,” *Univ. Canterbury, New Zeal.*, pp. 1–17, 2000, Accessed: Feb. 18, 2014. [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:The+Maori+God+of+Volcanoe+s+and+Earthquakes#5>.
- [21] M. Giberson, “Two nonlinear beams with definitions of ductility,” *J. Struct. Div.*, vol. 95, no. 2, pp. 137–257, 1969.
- [22] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, “Theoretical Stress-Strains Model for Confined Concrete,” *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1988.
- [23] ASCE/SEI, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-17*. 2017.

Assessing intervention measures to improve ventilation rates in an university classroom

Evaluación de intervenciones para mejorar las tasas de ventilación en un aula universitaria

Jose Ali Porras-Salazar
School of Architecture, UCR
e-mail: jose.porrassalazar@ucr.ac.cr

Jan-Frederik Flor
Faculty of Architecture and Ekistics, Universiti Malaysia Kelantan
e-mail: frederik@umk.edu.my

Keywords:

Air changes per hour, Carbon dioxide, Educational spaces, Indoor air quality, Ventilation rates.

Palabras clave:

Calidad del aire interior, Dióxido de carbono, Espacios educativos, Renovaciones de aire por hora, Tasas de ventilación.

ABSTRACT

Indoor air quality plays a fundamental role in the health and well-being of people. Ventilation is one of the most effective ways to improve it. We conducted a field study at the University of Costa Rica's School of Architecture to assess a classroom's air-change rate and the maximum permitted space occupancy by international standards. We explored if simple interventions like leaving doors open or employing fans to redistribute incoming air would increase ventilation rates in the classroom. We used the concentration-decay method with metabolic CO₂ as a tracer gas to determine the air change rate in the space under regular use and intervention conditions as well as the maximum number of students the classroom could accommodate. Our results show that air changes per hour were five times higher during the intervention than under normal conditions. With the improvements, classroom occupancy can be increased from 7 to 59 students while still meeting the ASHRAE 62.1-2022 standard. Our study demonstrates that simple changes in the spatial setting can significantly improve ventilation, positively impacting user well-being and health.

RESUMEN

La calidad del aire interior juega un papel fundamental en la salud y bienestar de las personas. Una de las formas más efectivas de mejorarla es la ventilación. Realizamos un estudio de campo en un aula de la Universidad de Costa Rica para evaluar la tasa de renovación del aire y la ocupación máxima permitida según los estándares internacionales. Exploramos si intervenciones simples como dejar las puertas abiertas o emplear ventiladores para redistribuir mejor el aire entrante aumentan las tasas de ventilación.

Utilizamos el método de *concentration-decay* con CO₂ metabólico como gas trazador para determinar la tasa de cambio de aire en el espacio bajo condiciones de uso normal y de intervención, así como el número máximo de estudiantes que podría alojar el aula. Nuestros resultados muestran que los recambios de aire por hora fueron cinco veces mayores durante la intervención que bajo condiciones normales. Con las mejoras, es posible incrementar la ocupación del aula de 7 a 59 estudiantes sin dejar de cumplir con el estándar ASHRAE 62.1-2022. Nuestro estudio muestra que modificaciones simples pueden mejorar significativamente la ventilación impactando positivamente el bienestar y salud de los usuarios.

I. INTRODUCTION

Humans are now spending a greater amount of time in enclosed spaces than at any other period in history [1]. This trend can be attributed to technological advancements, urbanization, and significant changes in lifestyle and working conditions. Buildings and vehicles contain only a small volume of air and limit free air movement. This condition reduces the displacement and dilution of pollutants from sources close to humans, such as humans themselves, pets, open fires, building materials, and furnishings. Furthermore, new pollutants are constantly being created and brought into buildings in the form of various products and materials. Consequently, the indoor air is often more polluted than the outdoor air. Indoor air quality (IAQ) plays a fundamental role in occupants' health, comfort and well-being and might even affect our cognitive performance [2], [3]. Indoor air pollutants can cause immediate health problems such as eye, nose, and throat irritation, headaches, dizziness, fatigue, and heart and lungs stress, due to the additional effort that must be done to supply oxygen to the body. Some adverse health effects have been attributed to specific pollutants like radon, carbon monoxide, or asbestos [4]. Long term exposure may cause permanent health effects shortening the life span or even death [4]. Therefore, in recent times, the quality of the air we breathe has received increasing attention from governments, political institutions, and the scientific community. Especially educational spaces where large groups of students spend several hours daily in an enclosed space have raised awareness on effective ventilation measures [5].

The most common practice to improve air quality in indoor spaces is ventilation: The process of supplying or extracting air from a space displacing odours and contaminants or diluting them into non-harmful concentrations. The air-change rate (ACR) is commonly used to quantify how much outside air enters the building — both through ventilation and infiltration. The ACR has units of 1/time and when the time unit is hours it is also known as air changes per hour (ACPH) [6]. If the air in the space is perfectly mixed, the ACPHs would be a measure of how many times the air within a defined space is replaced every hour; however, this is rarely the case. What is commonly accepted is that if a room has an ACPH of 1 h⁻¹, 63% of the indoor air will have been replaced in one hour by outdoor air.

ACRs can be determined using the concentration-decay method, which involves using a tracer gas to measure the decay rate of the gas concentration in a sealed room [7]. One common tracer gas used for this method is metabolic CO₂ [8], which is produced by humans and animals as a byproduct of respiration. By measuring the concentration of CO₂ in a room over time after a metabolic CO₂ source has been removed, the decay rate of CO₂ concentration can be calculated. This decay rate is then used to determine the ACR [9].

Since no simple index for defining the level of IAQ has been agreed upon [10], and CO₂ concentration is relatively easy to measure, it has long been used as a means of determining outdoor air ventilation rates, and thus as a proxy for indoor air quality [11].

A. Case study

Sala Garbo is an auditorium-type university classroom located on the third floor of one of the two buildings that houses the School of Architecture of the University of Costa Rica. The room has an area of 75 m² and a height of 3.3 m, at the highest point and 2.2 m at the lowest (air volume = ~177.5 m³). Except for the entrance wall, which is a drywall, it is built entirely of masonry. It can hold up to 80 students seated in rows of 10 fixed desks divided by a single central aisle. The room is accessible by two doors on the west wall from an internal passageway. Each door has a vent at the top. After a major renovation entrance doors, floors, and chairs were changed and two wall-mounted extractor fans, that had the purpose of ventilating and cooling the classroom, were sealed. For thermal comfort, a mini split air conditioning (AC) unit was installed. A schematic drawing of the classroom is shown in Fig. 1.

Since its refurbishment and until the global pandemic caused by SARS-CoV-2, the classroom was generally used with the AC on. Doors and vents were closed to allow the area to be cooled more easily and energy efficiently, as well to reduce noise from the hallway. However, during the pandemic, ventilation in indoor spaces was identified as a critical element in minimizing the risk of contagion of diseases that can be transmitted by aerosols. However, very little is known about indoor air quality in Costa Rican educational buildings. Given the tropical climate, most buildings are naturally ventilated, and it is assumed that enough fresh air from outside enters the indoor spaces. However, the actual ventilation during occupancy remains generally unknown due to the nonexistence of national standards that would oblige us to indicate the ventilation rate in buildings at the design stage and checking during post- occupancy.

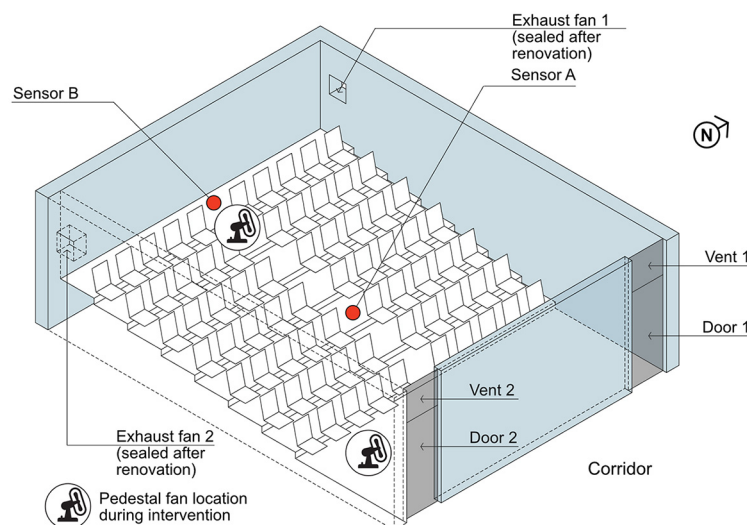


Fig. 1. Isometric scheme of *Sala Garbo* showing the position of the measurement devices and the location of the pedestal fans during the intervention.

Therefore, we carried out a field study with the objective of determining the ACR of the classroom under the current conditions of use and the maximum allowable space occupancy in compliance with ASHRAE 62.1-2022 [12]. We also inquired whether the application of simple interventions such as leaving doors open or using fans to better redistribute incoming air could significantly increase ventilation rates in the classroom. Finally, we determined the ventilation rate under the intervention conditions and estimated whether there were changes in the maximum capacity of the classroom.

II. METHODS

A. Assessment of ventilation rates under normal conditions.

In this study, we used the concentration-decay approach to determine the ACRs with metabolic CO₂ as the tracer gas. To increase the CO₂ concentration in the room, volunteers collaborated carrying out a moderate activity in the space while openings were closed. Two pedestal fans (speed 2.4 m/s), located at the front and the back of the room, were used to mix the air in the space to make the CO₂ concentration as uniform as possible. After one hour, the volunteers quickly left the space. The CO₂ concentration was measured using a HOBO data logger model MX-1102 (± 50 ppm). The equipment was calibrated before use according to the manufacturer's conditions. We deployed the sensor (A) at the center of the classroom and configured it to record CO₂ at 1-minute intervals. Previously, we monitored CO₂ for 15 minutes to record the background concentration in the classroom. For the estimation of the ACPH, we assumed that the amount of air changed after 1 hour and 1 ACPH would be around 63%. Therefore, in equation 1 we used $h_{63\% \text{ decay}}$ which is the time it takes for the excess of CO₂ in the room to decay to 37% of its peak ($CO_{2, 63\% \text{ decay}}$).

$$ACPH = \frac{1}{h_{63\% \text{ decay}}} \quad (1)$$

To estimate $h_{63\% \text{ decay}}$, we first calculated the concentration of CO₂ at 63% of the peak ($CO_{2, 63\% \text{ decay}}$) by using equation 2. Where $CO_{2, \text{start}}$ is the carbon dioxide concentration measured before entering into the classroom, $CO_{2, \text{peak}}$ is the concentration when the people left the classroom, and $\exp(-1)$ is the estimated percentage of air left in the space after one hour.

$$CO_{2, 63\% \text{ decay}} = CO_{2, \text{start}} + \exp(-1) \times (CO_{2, \text{peak}} - CO_{2, \text{start}}) \quad (2)$$

Thereafter, we created a graph with the measurements carried out in the classroom, where we plotted $CO_{2, \text{peak}}$ and $CO_{2, 63\% \text{ decay}}$ and read the time as shown in Fig. 2.

B. Assessment of ventilation rates under intervention conditions.

During the intervention, we changed the following classroom conditions: (i) both doors and vents remained fully open to allow as much air inlet as possible. (ii) We placed two pedestal fans in the classroom with a speed of 4.3 m/s, one at the front and the other at the back, to ensure that outside air entering the space would not only stay near the doors and flow into the classroom's interior. (iii) We removed the 40 X 40 cm plates covering the openings where the exhaust fans used to be. To estimate the ventilation rates under intervention measures, we used the same procedure as described above. The CO₂ concentrations were measured with two HOBO data loggers. We deployed the sensors in two different places at desktop height. Logger A was placed at the center of the classroom and recorded CO₂ at 1- minute intervals, while logger B was located at the back and carried out measurements at 10-minute intervals. Background concentration was measured before entering the classroom.

C. Estimation of the largest number of people expected to occupy the classroom during typical use.

By using equations 3 and 4, we computed the maximum number of people who could occupy the classroom (P_z) while still complying with ASHRAE Standard 62.1-2022 based on the ventilation rates estimated during normal and intervention conditions. $ACPH$ is the air change rate per hour, Q is the outdoor airflow, V is the air volume of the classroom, R_p is outdoor airflow rate required per person, R_a is the outdoor airflow rate required per square meter, A_z is the classroom floor area, and P_z the number of people in the classroom. We determined R_p , R_a from Table 6.2.2.1 of the Standard ASHRAE 62.1-2022 [12]. The selected occupancy category was *lecture classroom in the educational facilities* section.

$$ACPH = \frac{Q \times 3.6}{V} \quad (3)$$

$$Q = R_p \times P_z + R_a \times A_z \quad (4)$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

The results in Fig. 2 and Table 1 show that under normal conditions it was necessary to wait 1 hour for the excess CO₂ in the room to decay to 37% of its peak, so the ACPH is 1.0. While in intervention conditions the time was reduced to 12 minutes, one fifth and the ACPH rose to 5.0. This indicates that the applied measures were capable of generating great improvements in ventilation. With the new ACR, we estimated that it is possible to have up to 59 occupants in the classroom —73% of its maximum capacity— and still comply with the ventilation requirements of the Standard ASHRAE 62.1-2022 (Table 2). To achieve full capacity additional measures should be taken to increase ventilation up to 6.7 ACPH (4 L/s per person).

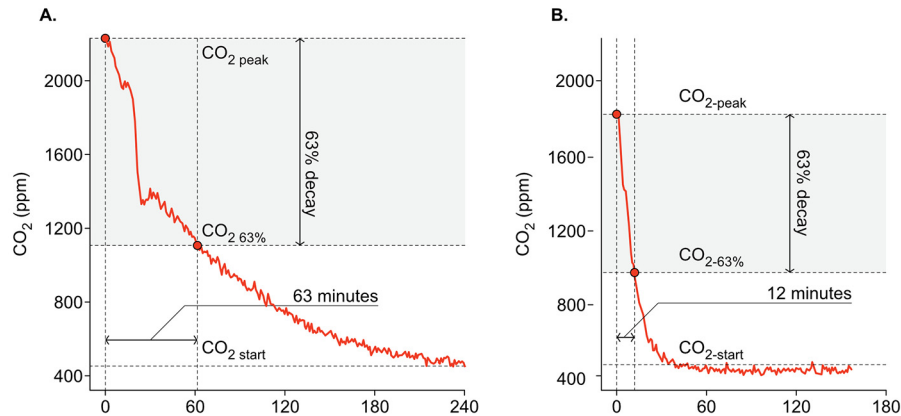


Fig. 2. Estimation of the time to reach 37% of the CO₂ peak under normal (A.) and intervention conditions (B.).

CHART I.
ESTIMATION OF CLASSROOM'S AIR CHANGE RATES
UNDER NORMAL AND INTERVENTION CONDITIONS USING
THE CONCENTRATION-DECAY METHOD AND CO₂ AS THE TRACER GAS.

	CO ₂ start (ppm)	CO ₂ peak (ppm)	CO ₂ excess (ppm)	CO ₂ 63% (ppm)	Time to reach 37% of CO ₂ peak (hours/minutes)	ACPH
Normal conditions	453	2230	1777	1107	1.0 / 62	1
Intervention conditions	460	1820	1360	960	0.2 / 12	5

CHART II.
MAXIMUM CLASSROOM OCCUPANCY ESTIMATION BASED ON AIR CHANGE RATES.

	ACPH	Outdoor airflow rate required per unit area (L/s m ²) (1)	Outdoor airflow rate required per person (L/s person) ⁽¹⁾	Ventilation rate (L/s)	Classroom maxi- mum number of occupants (n)
Normal conditions	1	0.3	3.8	49	7
Intervention conditions	5	0.3	3.8	247	59

⁽¹⁾ Determined from Table 6.2.2.1 of the Standard ASHRAE 62.1-2022 [12]. Educational facilities: lectureclassroom.

Since the study was limited to a single space, it was not possible to consider the effect of other spatial features such as scale, function, and geometry. Future research could close this gap by using simulation studies to test more variables to understand the impact on the ACR. Another

aspect stemming from the fact that our assessment study was confined to only one classroom is that the interventions we propose might not be as suitable or effective as in other spaces. A reasonable approach to tackle this issue could be to investigate more space typologies, for example, the main auditorium and the computer laboratories at the University of Costa Rica School of Architecture. A limitation related to the method we used for the maximum occupancy calculation is that it did not consider other environmental variables relevant to health and comfort. We also did not ask teachers and students about their perception of the noise level in the classroom attributed to open classroom doors or fan operation. This aspect could potentially have a detrimental effect on learning outcomes and general well-being, and it is worth exploring in future research.

CONCLUSIONS

This study was designed to determine the effect of simple spatial and operational intervention measures on the air change rate of a university classroom at the University of Costa Rica. We demonstrated in a field study that with simple measures such as opening doors or placing fans within a classroom, ventilation rates can be improved by factor five and while increasing the maximum allowable occupancy number of students from 7 to 59 at the same time, following international standards. Although the results are specific to the investigated classroom, they highlight a more general problem of the inadequacy of ventilation design in educational spaces. With our findings we offer an optimistic outlook towards implementing low-cost and low-impact interventions that can significantly improve air quality and health not only in university classrooms. We suggest this as an approach that can be extended to other working and living places where more substantial retrofitting measures are not viable due to physical, financial, or legislative restraints, idiosyncratic to regions of the global south. Our study therefore contributes to the ongoing discussion on the air quality in educational spaces of higher education arguing for more awareness among building managers and designers.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their gratitude to the volunteers who helped increase the CO₂ concentration in the classroom during the study. We are grateful to the Laboratorio de Arquitectura Tropical (LAT-UCR) for kindly providing the measurement equipment used in this study.

REFERENCES

- [1] N. E. Klepeis *et al.*, “The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants,” *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, vol. 11, no. 3, pp. 231–252, Jul. 2001, doi: 10.1038/sj.jea.7500165.
- [2] Y. Fan, X. Cao, J. Zhang, D. Lai, and L. Pang, “Short-term exposure to indoor carbon dioxide and cognitive task performance: A systematic review and meta-analysis,” *Build. Environ.*, vol. 237, p. 110331, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110331.

- [3] P. Wargocki, J. A. Porras-Salazar, S. Contreras-Espinoza, and W. Bahnfleth, "The relationships between classroom air quality and children's performance in school," *Build. Environ.*, vol. 173, p. 106749, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106749.
- [4] US EPA, "Indoor Air Quality: What are the trends in indoor air quality and their effects on human health?," Nov. 02, 2017. <https://www.epa.gov/report-environment/indoor-air-quality> (accessed May 24, 2023).
- [5] M. M. Andamon, P. Rajagopalan, and J. Woo, "Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO2 concentration measurements," *Build. Environ.*, vol. 237, p. 110313, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110313.
- [6] A. K. Persily, "Field measurement of ventilation rates," *Indoor Air*, vol. 26, no. 1, pp. 97–111, Feb. 2016, doi: 10.1111/ina.12193.
- [7] A. Persily, "Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide," *Trans.-Am. Soc. Heat. Refrig. Air Cond. Eng.*, vol. 103, pp. 193–204, 1997.
- [8] A. Persily and W. S. Dols, *The relation of CO2 concentration to office building ventilation*. ASTM International, 1990.
- [9] R. Daghigh, N. M. Adam, and B. B. Sahari, "Ventilation Parameters and Thermal Comfort of Naturally and Mechanically Ventilated Offices," *Indoor Built Environ.*, vol. 18, no. 2, pp. 113–122, Apr. 2009, doi: 10.1177/1420326X09103013.
- [10] P. Wargocki, "Ventilation, Indoor Air Quality, Health, and Productivity," in *Ergonomic Workplace Design for Health, Wellness, and Productivity*, A. Hedge, Ed., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.
- [11] A. ASTM, "D6245-18, Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation." West Conshohocken, PA., 2018.
- [12] ASHRAE, "ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality." American Society of Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2022.

Desarrollo de una metodología de inspección de puentes utilizando sistemas aéreos no tripulados

Development of a bridge inspection methodology using unmanned aerial systems

Andrés Ureña Mora

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

e-mail: heiner.urenamora@ucr.ac.cr

María José Rodríguez Roblero

Profesora instructora, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

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

Luis Guillermo Vargas Alas

Ingeniero, Unidad de Puentes del Lanamme, UCR

e-mail: luisguillermo.vargas@ucr.ac.cr

Paul Antonio Vega Salas

Jefe, Oficina de Geomática del Lanamme, UCR

e-mail: paulantonio.vega@ucr.ac.cr

Palabras clave:

INSPECCIÓN DE PUENTES, ortofotos, sistemas aéreos no tripulados, inspecciones basadas en video, modelos 3D.

Keywords:

BRIDGE INSPECTION, orthophotos, unmanned aerial systems, video-based inspections, 3D models.

RESUMEN

Los puentes son componentes fundamentales de todo sistema de transporte y para asegurar su funcionamiento es necesario que se les dé mantenimiento de forma oportuna. Para ello es indispensable conocer la condición de los puentes en servicio mediante inspecciones periódicas, las cuales consisten en la inspección visual del puente por parte de un inspector capacitado. Los Sistemas Aéreos No Tripulados (SANT), conocidos también como Vehículos Aéreos No Tripulados, pueden ser una herramienta muy útil en las inspecciones rutinarias de puentes, ya que evitan la interrupción del tráfico, reducen en gran medida los riesgos para los inspectores, disminuyen los costos de operación, y permiten obtener información más detallada que con las inspecciones visuales tradicionales. Esta investigación describe una metodología desarrollada para incorporar el uso de SANT en inspecciones rutinarias en los puentes de Costa Rica. Se describen las principales diferencias con otros tipos de inspecciones y se explican las principales ventajas y las limitaciones reportadas a nivel internacional.

ABSTRACT

Bridges are fundamental components of any transportation system and to ensure their operation it is necessary that they are maintained in a timely manner. Therefore, it is essential to know the condition of the bridges in service through periodic inspections, which consist of a visual inspection of the bridge by a trained inspector. Unmanned Aerial Systems (UAS), also known as Unmanned Aerial Vehicles, can be a very useful tool in routine inspections of bridges, since they prevent traffic interruption, greatly reduce risks for inspectors, reduce operating costs, and allow to obtain more detailed information than with traditional visual inspections. This research describes a methodology developed to incorporate the use of UAS in routine inspections of bridges in Costa Rica. The main differences with other types of inspections are described and the main advantages and limitations are explained according to international experiences.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro de un sistema de transporte los puentes son componentes clave, ya que estas estructuras regulan la capacidad del sistema limitando la carga que puede transitar o la cantidad de carriles disponibles para el tránsito. Si un puente falla o colapsa por exceso de carga, por deterioro en el tiempo o deficiencias provocadas por eventos extremos, no solamente se producen pérdidas directas evidentes (como el daño en la infraestructura, posibles víctimas o interrupción de la comunicación), sino que se producen también pérdidas indirectas relacionadas con el tiempo en el que la estructura está fuera de servicio, como son los retrasos en los tiempos de viaje y la disminución del comercio de bienes y servicios entre ciudades [1].

Las inspecciones de rutina y detalladas de los elementos estructurales y no estructurales de un puente son necesarias para realizar las labores de conservación que permitan garantizar la vida útil de las estructuras y su adecuado funcionamiento. Las inspecciones rutinarias generalmente son inspecciones visuales, pero estas inspecciones presentan inconvenientes, por ejemplo: los altos costos debido al tiempo requerido en sitio para efectuarlas y para acceder a todos los elementos, el requerimiento de equipos mecánicos o de andamios para tener acceso a los diferentes componentes, el riesgo para los inspectores y la limitación del tránsito durante la ejecución de las inspecciones. Por estos inconvenientes se puede llegar a desincentivar la realización de las inspecciones, lo cual puede llegar a representar un riesgo para los usuarios cuando la integridad de la estructura no se garantiza porque se desconocen las necesidades de atención y no se implementan estas acciones de forma oportuna [2], [3], [4].

En las inspecciones de puentes los Sistemas de Aeronaves No Tripuladas (SANT), conocidos también como Vehículos Aéreos No Tripulados (término obsoleto según la Dirección General de Aviación Civil [5]), pueden utilizarse como complemento a las inspecciones visuales. Los SANT se componen de una aeronave no tripulada, una estación de control, el enlace de mando y los operadores humanos como un piloto y un observador. Estos sistemas aéreos resultan de gran utilidad ya que contribuyen a disminuir muchos de los inconvenientes mencionados sobre las inspecciones realizadas comúnmente, como las En Costa Rica los SANT se han utilizado en las inspecciones visuales de infraestructura para la evaluación precisa de secciones críticas a las cuales se tuvo acceso mediante su uso [8], [9]. Sin embargo, el uso de SANT en las inspecciones rutinarias o en las inspecciones ante eventos extremos no está incorporado de forma sistematizada. La existencia de una metodología facilitaría implementar su uso y podría complementar la información recopilada

de acuerdo con los requisitos establecidos en los manuales de inspección de puentes oficiales y protocolos de inspección ante eventos extremos.

Con el propósito de brindar una visión general de cómo se podría incluir el uso de SANT en esta ponencia se describe brevemente las características de la información que puede recopilarse utilizando este tipo de sistemas, algunos ejemplos de aplicación en otros países y finalmente se describe la metodología propuesta para Costa Rica.

II. METODOLOGÍA

La metodología seguida en este proyecto consiste en tres etapas principales. En la etapa I se realizó una investigación sobre los diferentes tipos de información que se pueden obtener utilizando los SANT y la implementación de su uso en otros países. Con base en esta información en la etapa II se desarrolló una metodología de inspección de puentes en donde se utilizan los SANT como una herramienta de recolección de datos. En la etapa III se concluye acerca de la utilidad y ventajas de utilizar los SANT en las inspecciones de puentes a partir de la validación de la metodología al aplicarla en inspecciones de puentes reales.

A. Métodos de recopilación de información mediante el uso de SANT

La recopilación de información en las inspecciones con vehículos aéreos generalmente se realiza mediante fotografías y videos de alta resolución. Para la recopilación de fotografías, se requiere planificar vuelos de manera que éstas se tomen desde varios ángulos planificados para tener una amplia visión del elemento a inspeccionar. Con las imágenes individuales se construyen ortomosaicos y ortoplanos, los cuales representan áreas de mapas y de superficies planas respectivamente. Este tipo de representación tienen la ventaja que se pueden medir áreas y distancias, evaluar la condición y sirven para documentación histórica [10]. Con las fotografías recopiladas también es posible realizar un modelo de la estructura y la generación de nubes de puntos mediante el proceso de reconstrucción en tres dimensiones. Para la generación de modelos, las rutas de vuelo deben ser planificadas según la configuración de la estructura para evitar problemas de precisión, altos niveles de ruido y largos tiempos de procesamiento de datos [11].

El método de recopilación de datos mediante videos de alta resolución facilita la fase de operación al ahorrar tiempo durante la inspección y evita errores de omisión como puede ocurrir con las fotografías. La calidad de los videos depende de la capacidad que tenga el piloto al mando para controlar el SANT. Tiene como limitación que requiere una gran cantidad de almacenamiento. De igual forma que para el caso de las fotografías, las rutas de vuelo para tomar videos deben ser predefinidas [1].

B. Implementación del uso de vehículos aéreos no tripulados internacionalmente

Con el propósito de mostrar las características generales de las inspecciones que incluyen sistemas aéreos no tripulados internacionalmente se presentan ejemplos de metodologías utilizadas en proyectos en Estados Unidos y en Italia.

El Departamento de Transporte de Minnesota (MnDOT) sugiere dos flujos de trabajo. En la Fig. 1a se muestra un flujo que inicia por una inspección de campo en donde se identifican las deficiencias, luego se realizan los vuelos con SANT y a partir de la información recopilada se pueden medir las deficiencias. La aplicación más común de este flujo es para la inspección del tablero de la estructura, en donde no se tiene dificultad de acceso. Sin embargo, se debe realizar control del tráfico para identificar las deficiencias en el tablero [10].

El flujo mostrado en la Fig. 1b inicia con la recopilación de datos con SANT para generar un modelo 3D que se pueda utilizar en la inspección de campo posterior para anotar las deficiencias en el puente [10].

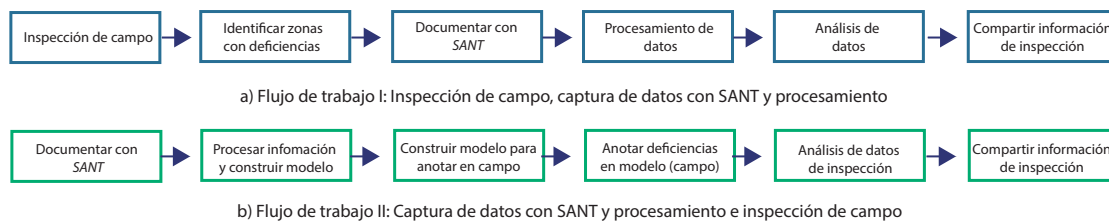


Fig. 1. Diagramas de flujos de trabajo utilizados para la captura de datos con SANT en inspecciones de puentes de MnDOT.

La Fig. 2 muestra el proceso utilizado en el Departamento de Transporte de Oregón (ODOT) el cual destaca que las operaciones deben realizarse bajo las regulaciones correspondientes y condiciones de seguridad. Aunque no se indique la transmisión de la información, ODOT sí plantea que se utilicen los procedimientos según lo indican las autoridades correspondientes para inspección, los cuales sí incluyen la necesidad de reportes de inspección [12].

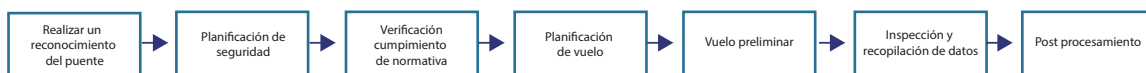


Fig. 2. Diagrama de flujo de trabajo de inspección con SANT de ODOT.

En Italia, en el 2022 se propuso un flujo de trabajo para las inspecciones en sitio para evaluar la condición de los puentes enfocado en la detección de daños. El flujo se muestra en la Fig. 3 y éste se centra en el diseño de la planificación de la misión, la óptima ejecución de la inspección y la recopilación de datos, el procesamiento y la entrega, según sean las necesidades para tomar decisiones [1].

Las metodologías desarrolladas en MnDOT puede ser útiles cuando se requieran realizar inspecciones visuales con mayor detalle a componentes estructurales específicos. Por otra parte, los flujos propuestos en ODOT y en Italia tienen un enfoque más general e incluyen la planificación del uso de los SANT como parte del marco de inspección. Con respecto al procesamiento de los datos, tanto en MnDOT como en ODOT, se recomienda utilizar programas especializados con herramientas avanzadas que permiten visualizar las imágenes con las que fue generado cada punto en el modelo. De esta manera no se requiere crear un registro fotográfico extenso, sino que se pueden organizar

mejor las imágenes y es mucho más sencillo el proceso de documentación de la inspección. Además, la generación de archivos como ortomosaicos, son sumamente útiles para cuantificar deficiencias, ya que se pueden medir áreas o distancias [10],[12]. En ODOT también se realiza un sistema de calificación que designa una mayor utilidad del uso de los SANT en las inspecciones de rutina y de inventario [12]. En Italia, para el procesamiento de los datos de igual forma se recomienda el uso de programas de escritorio o basados en la web, que contienen herramientas avanzadas de medición de áreas, distancias, etc. en los modelos y se resalta la importancia de contar con formularios de inspección en cada inspección para agilizar el procesamiento y el llenado de informes de inspección [1].

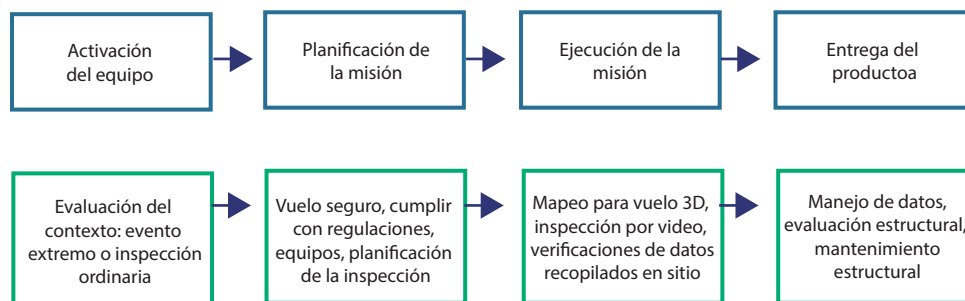


Fig. 3. Flujo de trabajo de una metodología de inspección de puentes basado en SANT propuesto en Italia para evaluar la condición de puentes en servicio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según se indicó anteriormente, a pesar de que en Costa Rica se han utilizado SANT en inspecciones de infraestructura [8], no se cuenta en la actualidad con una metodología para la inspección de puentes. Tomando en consideración la información relacionada al uso de los SANT en otros países y la normativa aplicable, se propone una metodología para la inspección rutinaria de puentes en Costa Rica, acorde con los manuales de inspección de puentes vigentes. Esta metodología se muestra esquemáticamente en la Fig. 4 y seguidamente se detallan cada una de las fases.

La *primera fase* consiste en planificar la inspección de manera que se pueda garantizar la seguridad del equipo y de los participantes y una recopilación de datos precisa y con la calidad requerida. Previamente, se debe realizar un reconocimiento de la estructura y su ubicación para revisar que se cumplan con las regulaciones de operación indicadas en la Directiva Operacional de la Dirección General de Aviación Civil [5] y que sea apto para utilizar los SANT como herramienta de recopilación de datos según factores de tamaño, forma, ambientales, etc., ya que en algunos puentes podría no ser necesario su uso. También se debe revisar planos constructivos e informes de inspección anteriores a los que se tenga acceso, ya que esta información permite conocer la geometría de la estructura, la ubicación de los elementos principales y zonas donde anteriormente se identificaron daños. Se deben definir los objetivos de la inspección, para no recopilar un exceso de datos y así ahorrar tiempo en sitio y de procesamiento.

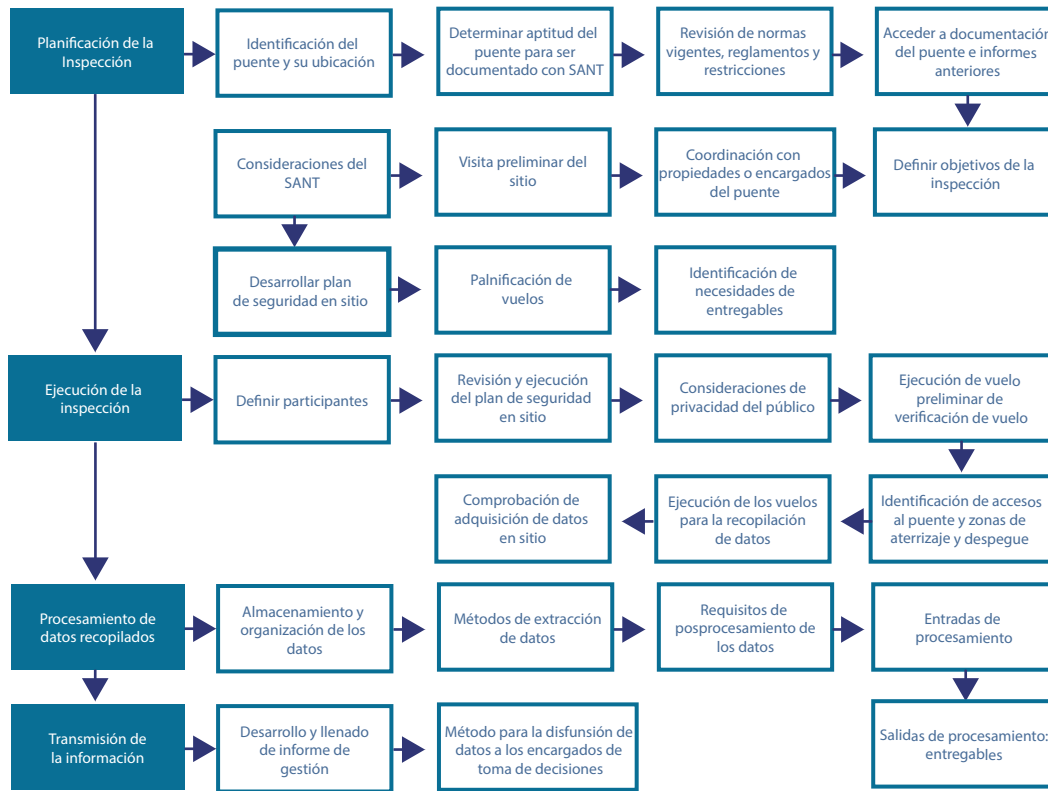


Fig. 4. Flujo de trabajo propuesto para el uso de SANT como herramienta para las inspecciones de puentes.

Siempre que sea posible se recomienda realizar una visita preliminar al sitio para la identificación de los accesos, zonas de despegue y aterrizaje y factores ambientales. El equipo que se va a utilizar depende de la misión de la inspección, pero se recomienda que cumpla con especificaciones mínimas adecuadas, por ejemplo, capacidad de la batería, sensores de detección de obstáculos y cámara de alta resolución, entre otras. El desarrollo del plan de seguridad en el sitio es esencial para evitar y mitigar los riesgos asociados, como pérdida o daño del equipo y accidentes. Los vuelos se pueden realizar de manera manual o preprogramado y las rutas de vuelo deben ser definidas con anterioridad dependiendo de la configuración de la estructura, los objetivos de la inspección, y los entregables deseados, para lograr una recolección de datos eficiente. Por ejemplo, entre de los entregables requeridos podrían estar los ortomosaicos, los cuales se pueden utilizar para recopilar información de daños en el tablero del puente. Los ortoplanos en cambio se utilizan cuando se requiere inspeccionar una parte plana vertical de la estructura, como costados de la superestructura o las caras de las pilas en la subestructura. Los modelos 3D de zonas críticas de la estructura pueden ser de utilidad para compararlos a lo largo del tiempo y cuantificar la evolución de los daños. Para estos entregables se debe asegurar una superposición de al menos un 75 % entre fotografías (ortoarchivos) o entre vuelos (modelos 3D), por lo que se debe considerar en la planificación de las rutas de vuelo.

La *segunda fase* corresponde a la ejecución de la misión de la inspección en sitio, que debe ser realizada durante el día. Se deben definir los inspectores que estarán a cargo, un piloto al mando con licencia y al menos un observador (puede ser un inspector) que tenga a la vista el SANT con

el fin de evitar accidentes por colisiones. Una vez en el sitio lo primero es revisar y ejecutar el plan de seguridad incluyendo una sesión informativa por parte del inspector a cargo. Aunque en muchas de las inspecciones de puentes no hay propiedades cerca o público presente, se deben tomar en cuenta consideraciones del respeto a la privacidad. Se recomienda realizar un vuelo preliminar para verificar que la aeronave, el mando de control, y los puntos de control en tierra funcionen correctamente. En caso de que no se haya realizado una visita preliminar al sitio, se procede a identificar zonas seguras de aterrizaje y despegue, así como los accesos al puente, por ejemplo, a los bastiones. Una vez que inicia el vuelo, deben tomarse en cuenta consideraciones dependiendo del tipo de entregable que se requiere, por ejemplo, proximidad a la estructura, modo de vuelo, seguimiento de rutas establecidas, superposición de imágenes, así como interacciones entre el piloto al mando, el observador y los inspectores. Una comprobación rápida de los datos adquiridos en sitio es necesaria antes de finalizar la operación.

En la *tercera fase* se contempla el procesamiento de los datos posterior a la inspección. Éstos deben ser almacenados y organizados adecuadamente para facilitar su consulta e interpretación. Se deben tener claros los métodos para la extracción de los datos recopilados de la aeronave, y además realizar un respaldo de estos. Se debe verificar que se haya cumplido con los requisitos para el procesamiento de los datos, por ejemplo, la superposición necesaria para la realización de modelos 3D o archivos ortográficos. En el caso de las inspecciones basadas en videos, estos se pueden revisar en el orden planificado y según los objetivos y tomar fotografías de los elementos o zonas que se requieran, las cuales también puedan funcionar como entradas para el procesamiento de los datos. Las salidas del procesamiento resultan en modelos 3D con registros fotográficos, ortoarchivos, o simplemente fotografías de alta resolución.

La *cuarta y última fase* corresponde a la transmisión de la información. Los entregables generados deben ser compartidos a los encargados de la realización de los informes de inspección y de toma de decisiones sobre la estructura. Para compartir entregables como modelos 3D existen soluciones en la nube que resulta en un ahorro en el almacenamiento de grandes cantidades de datos. También hay softwares especializados en donde se pueden medir áreas y distancias en ortoarchivos y modelos 3D. Estos modelos se pueden utilizar para ubicar los registros fotográficos de una manera más ordenada y fácil de navegar y consultar. Con el uso de modelos y ortoarchivos se pueden completar con mayor facilidad y precisión los porcentajes de extensiones de daños de los formularios de inspección para posteriormente agregarlos a los informes de inspección. Es necesario agregar en los informes el detalle de la operación con SANT realizada, el equipo y las condiciones de la operación, el alcance de la misión, los entregables obtenidos y un resumen de resultados en donde se señalen las ventajas y las limitaciones del uso de las aeronaves.

CONCLUSIONES

El desarrollo de una metodología de uso de los SANT como herramienta para la recopilación de datos para realizar las inspecciones de puentes facilita la implementación del uso de estos equipos

y podría complementar la información recopilada de acuerdo con los requisitos establecidos en los manuales de inspección de puentes oficiales y protocolos de inspección ante eventos extremos.

De acuerdo con la literatura revisada y con la experiencia en el país, los SANT son una herramienta complementaria eficiente para la inspección de puentes debido a la efectividad para detectar daños gracias a las cámaras de alta resolución y a la facilidad de obtención de datos. Es importante señalar que la inspección de puentes con SANT siempre debe ir acompañada del criterio de un inspector capacitado y es requerido que este inspector esté presente en sitio cuando se realice el levantamiento de datos.

El uso de los SANT en las inspecciones de puentes favorece la seguridad en comparación con métodos de acceso tradicionales, ya que no se requiere utilizar vehículos de inspección debajo del puente, cuerdas, andamios o escaleras, lo que hace que los riesgos para el personal a cargo disminuyan. Por otra parte, también se reduce o se elimina la necesidad del cierre de carriles de tráfico, lo que disminuye el riesgo para los inspectores y para los conductores.

Los costos de operación asociados a una inspección también se pueden reducir con el uso de los SANT en puentes grandes al evitar el alquiler de los vehículos de inspección y el tiempo requerido para realizar las inspecciones. Aunque el procesamiento de datos aumente con el uso de estos equipos, el ahorro de los costos de la inspección, la calidad de los entregables y la facilidad de comunicación de los resultados de la inspección es mucho mayor. Ya que las decisiones de reparaciones y mantenimiento de los puentes se basan en el riesgo según los daños encontrados, con entregables de mejor calidad se pueden tomar mejores decisiones y hacer un uso más eficiente de los recursos.

Para determinar si la metodología propuesta es eficiente o si requiere de mejoras o adiciones, se debe realizar una segunda etapa de este trabajo, en donde se valide el proceso en puentes seleccionados de las rutas nacionales. En esta validación se espera determinar cuál es el entregable que mejor se adapta a los objetivos requeridos para cada puente, y cómo se optimiza el llenado de información en los formularios de inspección correspondientes al tipo de inspección que se realiza.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realiza en colaboración con la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural y la Oficina de Geomática, ambas partes del LanammeUCR. Se agradece a la institución por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] M. Mandirola, C. Casarotti, S. Peloso, I. Lanese, E. Brunesi, y I. Senaldi, "Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures", *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 72, p. 102824, abr. 2022, doi: 10.1016/j.ijdr.2022.102824.
- [2] S. Dorafshan y M. Maguire, "Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation", *J. Civ. Struct. Health Monit.*, vol. 8, núm. 3, pp. 443–476, jul. 2018, doi: 10.1007/s13349-018-0285-4.

- [3] J. Seo, L. Duque, y J. P. Wacker, “Field Application of UAS-Based Bridge Inspection”, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2672, núm. 12, pp. 72–81, dic. 2018, doi: 10.1177/0361198118780825.
- [4] A. P. Tomiczek, T. J. Whitley, J. A. Bridge, y P. G. Ifju, “Bridge Inspections with Small Unmanned Aircraft Systems: Case Studies”, *J. Bridge Eng.*, vol. 24, núm. 4, p. 05019003, abr. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001376.
- [5] Dirección General de Aviación Civil, “Operaciones con Sistema de Aeronave Piloteada a Distancia (RPAS)”. <https://www.dgac.go.cr/wp-content/uploads/2022/07/Modificacion-DO-002-OPS-RPAS-14-julio-2022.pdf> (accesado en May. 3, 2023).
- [6] J. Zink, B. Lovelace, y C. Engineers, “Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project Final Report”, p. 211, 2015.
- [7] A. Khaloo, D. Lattanzi, K. Cunningham, R. Dell’Andrea, y M. Riley, “Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling”, *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 14, núm. 1, pp. 124–136, ene. 2018, doi: 10.1080/15732479.2017.1330891.
- [8] P. Vega, P. Ruiz, y J. Garro, “Vehículos Aéreos No Tripulados del LanammeUCR: Una herramienta multidisciplinaria adaptada para todo tipo de condiciones al servicio del país”, vol. 8, núm. 4, noviembre de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/911/Boletin%204-%20Vehicu%20los%20aereos%20no%20tripulados.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] Unidad de Puentes LanammeUCR, “Evaluación de la condición del puente sobre el Río Virilla Ruta Nacional No. 32”, San José, Costa Rica, 1, dic. 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2105/LM-PIE-UP-P12-2019%20Evaluaci%20c3%b3n%20condici%20c3%b3n%20puente%20R.%20VirillaRN32.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [10] Jay Wells y Be Lovelace, “Improving the Quality of Bridge Inspections Using Unmanned Aircraft Systems (UAS)”, *Minnesota Department of Transportation*. <https://www.dot.state.mn.us/research/reports/2018/201826.pdf>
- [11] S. Chen, D. F. Laefer, E. Mangina, S. M. I. Zolanvari, y J. Byrne, “UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions”, *J. Bridge Eng.*, vol. 24, núm. 4, p. 05019001, abr. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343.
- [12] D. Gillins, C. Parrish, M. Gillins, y C. Simpson, “Eyes in the Sky: Bridge Inspections with Unmanned Aerial Vehicles”, Oregon Department of Transportation, feb. 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.oregon.gov/odot/Programs/ResearchDocuments/SPR787_Eyes_in_the_Sky.pdf

Materiales de construcción

Evaluación de propiedades de concretos de mediana resistencia producidos con insumos de Costa Rica

Correlations between seismic intensity measurements and engineering demand parameters: A case for Costa Rica

Bryan Solís Madrigal

Investigador principal, estudiante EIC, UCR

e-mail: bsolism22@gmail.com

Luis Carlos Meseguer Quesada

Director de Proyecto, Profesor EIC, UCR

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

Palabras clave:

Agregados, Asentamiento, Concreto, Módulo de Elasticidad, Resistencia a compresión, Resistencia a tracción.

Keywords:

Aggregates, Compressive Strength, Concrete, Modulus of Elasticity, Slump, Tensile Strength.

RESUMEN

La investigación tiene el objetivo de evaluar las propiedades mecánicas de concretos de mediana resistencia producidos con agregados de dos fuentes distintas y cemento de uso general disponibles en el país. La metodología experimental contempló los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales para proseguir con los diseños de mezcla, los cuales se realizaron según la guía ACI 211.1 para resistencias de 210 kg/cm², 280 kg/cm², 350 kg/cm² y 420 kg/cm². Posteriormente, se realizaron coladas de prueba para verificar el cumplimiento de las mezclas, haciendo pruebas de asentamiento y fallas a compresión tempranas. Finalmente se realizaron 16 mezclas de concreto y en cada una se moldearon 9 cilindros para ser fallados a compresión simple. Además, se llevaron a cabo los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción según la prueba brasileña. La interpretación de resultados consistió en una comparación de las resistencias y los valores del módulo de elasticidad que se obtuvieron para cada tipo de mezcla. De esta forma se generaron una serie de recomendaciones para el proceso de diseño de mezclas de concreto y la selección de agregados en el país.

ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the mechanical properties of medium-strength concrete produced with aggregates from two different sources and cement of general use available in the country. The experimental methodology included laboratory tests to determine the physical and mechanical properties of the materials to proceed with the mix designs, which were carried out according to ACI 211.1 guidelines

for strengths of 20,6 MPa (210 kg/cm²), 27,5 MPa (280 kg/cm²), 34,3 MPa (350 kg/cm²) and 41,2 MPa (420 kg/cm²). Subsequently, test pours were carried out to verify compliance with the mixes, testing slump and early compression failure. Finally, 16 concrete mixes were made, and 9 cylinders were molded in each one to be failed in simple compression. In addition, tests were carried out to determine the modulus of elasticity and tensile strength according to the Brazilian test. The interpretation of results consisted of a comparison of the strengths and modulus of elasticity values obtained for each type of mixture. In this way, a series of recommendations were generated for the design process of concrete mixes and the selection of aggregates in the country.

I. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más utilizado en Costa Rica para la construcción de obras de ingeniería debido a su versatilidad, bajo costo y gran durabilidad. Sin embargo, los concretos de mediana resistencia producidos con materiales comercializados en el país no cuentan con una caracterización experimental que evalúe las principales propiedades utilizadas para su aplicación como material estructural, esto significa una incertidumbre para los diseñadores estructurales, que los limita a la utilización de estimaciones generalizadas establecidas por códigos de diseño internacionales que no se ajustan a las características reales de los concretos producidos en el país.

Ante esta problemática, el presente estudio evalúa, a partir del desarrollo experimental, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad de concretos con resistencias entre 20,6 MPa (210 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²), para contar con valores más exactos para el diseño y recomendaciones al proceso de producción y utilización.

El presente trabajo pretende tener un impacto positivo en la producción nacional de concreto, a partir de una serie de recomendaciones que sirvan de referencia al mercado nacional para la producción de concretos de este nivel, basadas en el desarrollo experimental, los resultados obtenidos y su comparación con valores teóricos y de otras investigaciones similares.

II. METODOLOGÍA

La metodología experimental inició con la caracterización de los materiales utilizados en las mezclas de concreto para determinar que cumplieran con lo establecido en las especificaciones y obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas para la elaboración de los diseños de mezcla. Los ensayos fueron realizados según las normativas ASTM correspondientes.

Una vez realizados los ensayos de caracterización se procedió a realizar los diseños de mezcla según la guía ACI 211.1 [1] para resistencias de 20,6 MPa (210 kg/cm²), 27,5 MPa (280 kg/cm²), 34,3 MPa (350 kg/cm²) y 41,2 MPa (420 kg/cm²). Posteriormente se realizaron coladas de prueba para verificar el cumplimiento de las mezclas con lo esperado según el diseño, realizando pruebas al concreto fresco, así como fallas a compresión tempranas para corroborar el comportamiento de las resistencias.

Una vez que las mezclas de prueba cumplieron con lo esperado, se procedió a realizar las mezclas y las mediciones correspondientes en el concreto fresco para verificar su cumplimiento

y seguidamente moldear los especímenes requeridos para la investigación según la norma INTE C18 (ASTM C192) [2]. Se realizaron 16 mezclas de concreto con probetas normalizadas, por lo que cada una de las mezclas realizadas corresponde a una misma resistencia de diseño y agregados de la misma fuente.

Finalmente se obtuvieron las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto, para esto se fallaron los cilindros de 100 x 200 mm a compresión simple según la norma INTE C45 (ASTM C78) [3]. Además, se llevaron a cabo los ensayos para la determinación del módulo de elasticidad según la norma ASTM C469 [4] y la resistencia a la tracción según la prueba brasileña (ASTM C496) [5].

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

A. Agregados

Se obtienen los agregados de dos fuentes distintas. Por un lado, se tiene el Quebrador Cerro Minas de donde se utiliza un material denominado piedra quintilla con un tamaño máximo de 12,7 mm (1/2") y una arena industrial con un tamaño máximo nominal de 4,75 mm. La segunda fuente consiste en Agregados Guápiles, de donde se obtiene un material con tamaño máximo nominal de 12,7 mm (1/2") y una arena industrial con tamaño máximo nominal de 6,35 mm.

En la Fig. 1 se presentan las curvas granulométricas de ambas piedras utilizadas, así como los límites que se deben cumplir según la norma ASTM C33 [6]. Se puede observar que la piedra de Cerro Minas sobrepasa el límite fino establecido para el Tamiz de 4,75 mm (N°4). En cuanto a las arenas, Se puede observar que ambas incumplen con el límite grueso establecido en la norma INTE C15 [6] para agregados finos. Sin embargo, se utilizaron tal y como se obtienen en el mercado.

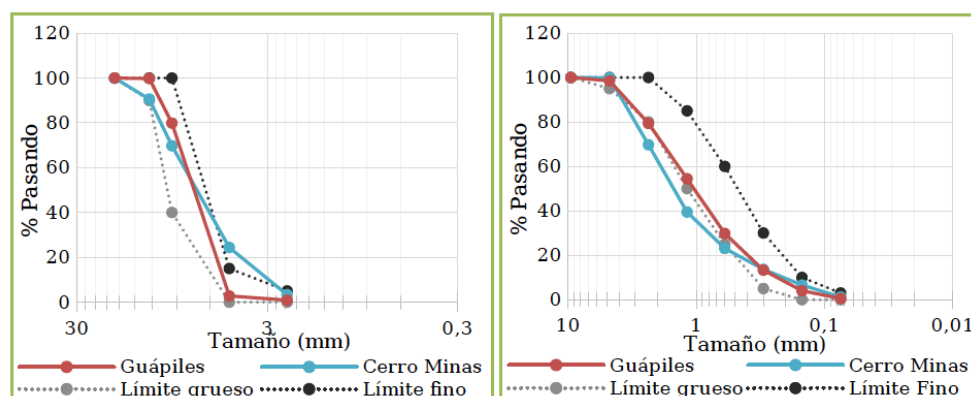


Fig. 1. Curvas granulométricas de agregados gruesos (izquierda) y agregados finos (derecha).

En el CUADRO I y en el CUADRO II se presentan otros resultados de interés.

CUADRO I.

RESUMEN DE RESULTADOS DE PESO UNITARIO Y VACÍOS DE AGREGADOS.

Tipo de agregado	Fuente	Peso Unitario		% Vacíos		MF
		Suelto	Varillado	Suelto	Varillado	
Gruesos	Guápiles	1500	1550	43	41	-
	Cerro Minas	1500	1540	41	40	-
Finos	Guápiles	1550	-	38	-	3,21
	Cerro Minas	1520	-	40	-	3,48

CUADRO II.

RESUMEN DE RESULTADOS DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS.

Tipo de agregado	Fuente	Gb	Gbs	Gbss	Absorción
Gruesos (INTE C68)	Guápiles	2,78	2,64	2,69	1,9 %
	Cerro Minas	2,69	2,56	2,61	1,9 %
Finos (INTE C69)	Guápiles	2,75	2,51	2,60	3,4 %
	Cerro Minas	2,68	2,54	2,59	2,1 %

B. Cemento hidráulico

Se utiliza un cemento Modificado Mixto, tipo MM/B-(P-C)-28 según RTCR 479:2015 [7], el cual está compuesto por Clinker, yeso, puzolana y caliza. Se determina que el material tiene una densidad de $3,02 \text{ g/cm}^3$, un valor de 26% de agua para alcanzar consistencia normal, un tiempo de fragua inicial de 143 minutos y un tiempo de fragua final de 264 minutos. Las resistencias del cemento registradas se presentan en el CUADRO III.

CUADRO III.

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTERO DE CEMENTO DE USO GENERAL.

Espécimen	Edad	Carga (N)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
1	7	43000	17,2	16,0
2		46000	18,4	
3		31000	12,4	
4	28	59000	23,6	25,1
5		63000	25,2	
6		66000	26,4	

C. Concreto

El concreto endurecido fue evaluado mediante tres ensayos como ya se ha mencionado previamente; resistencia a la compresión simple según la norma INTE C45 (ASTM C78) [3], determinación del módulo de elasticidad según la norma ASTM C469 [4] y la resistencia a la tracción según la prueba brasileña (ASTM C496) [5]. A continuación, se presentan la Tabla IV, la Tabla V y la Tabla VI donde se resumen dichos resultados.

CUADRO IV.
RESUMEN DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE
PARA LAS MEZCLAS PRODUCIDAS CON AGREGADOS DE RÍO.

Diseño	Contenido de cemento (kg/m ³)	7 días		14 días		28 días	
		MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
Mezclas con agregado de río							
210 kg/cm ²	321,6 kg/cm ³	19,0	193	25,0	255	29,1	297
280 kg/cm ² D1	409,1 kg/cm ³	25,4	259	30,3	309	32,6	333
280 kg/cm ² D2	380,6 kg/cm ³	19,6	200	25,2	257	29,0	296
350 kg/cm ²	409,1 kg/cm ³	26,8	273	31,2	318	39,6	404
420 kg/cm ²	479,2 kg/cm ³	31,1	317	36,5	373	44,1	449
Mezclas con agregado de tajo							
210 kg/cm ²	321,6 kg/cm ³	17,2	175	20,8	212	24,2	247
280 kg/cm ²	387,1 kg/cm ³	20,8	212	25,1	256	27,6	282
350 kg/cm ²	404,5 kg/cm ³	27,0	276	32,3	329	34,4	351
420 kg/cm ²	500,0 kg/cm ³	31,6	322	38,0	387	42,2	430

CUADRO V.
RESUMEN DE RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y
PORCENTAJERESPECTO A RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Resistencia a tracción				
Fuente	Diseño	MPa	kg/cm ²	Porcentaje de f'c
Guápiles	210 kg/cm ²	2,8	28	10%
	280 kg/cm ² D1	2,9	30	9%
	280 kg/cm ² D2	2,8	28	8%
	350 kg/cm ²	2,8	29	9%
	420 kg/cm ²	3,4	34	7%

	210 kg/cm ²	3,0	31	13%
Cerro Minas	280 kg/cm ²	3,6	37	13%
	350 kg/cm ²	4,5	46	12%
	420 kg/cm ²	4,6	47	10%

CUADRO VI.
RESUMEN DE RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDAD Y
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN RESPECTIVA.

Fuente	Diseño	Módulo de elasticidad		Resistencia a la compresión	
		MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
	210 kg/cm ²	27133,0	276681	29,1	297
	280 kg/cm ² D1	36141,3	368540	33,5	342
Guápiles	280 kg/cm ² D2	30460,7	310614	33,5	342
	350 kg/cm ²	37714,8	384586	32,1	327
	420 kg/cm ²	33587,3	342496	48,6	495
	210 kg/cm ²	30948,1	315584	24,6	251
Cerro Minas	280 kg/cm ²	31305,1	319224	26,6	271
	350 kg/cm ²	46958,1	478841	37,3	380
	420 kg/cm ²	30665,8	312705	43,7	446

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

1. Resistencia a la compresión según agua/cemento y Desarrollo de resistencia: se establecen rangos de relación a/c para factiblemente lograr las resistencias meta, con los materiales nacionales. Obtención de factores de proyección de la resistencia a la compresión a edad de 28 días, con edades de falla menores.
2. Eficiencia de dosificación y resistencia a la tracción: Obtención de formulaciones para lograr consistentemente concretos de mediana resistencia, de manera optimizada.
3. Resistencia a la tracción: Relaciones entre $f'c$ y $f't$ para los concretos de estudio.
4. Módulo de elasticidad: Obtención de valores experimentales de Módulo de Elasticidad (E), aplicables a diseños nacionales.

CONCLUSIONES

- Se logró la producción de concretos de mediana resistencia de hasta 450 kg/cm² con los insumos disponibles en el mercado nacional.

- Los concretos presentan resistencias a la compresión más altas si son producidos con agregados de río en comparación a los producidos con agregados de tajo. Los concretos presentan resistencias a la tracción más altas si son producidos con agregados de tajo en comparación a los producidos con agregados de río.
- Los concretos de mediana resistencia producidos con agregados de río son más eficientes que los producidos con agregados de tajo en tanto adquieren una mayor resistencia a los 28 días.
- Se propone la utilización de las ecuaciones para la aproximación de los valores de resistencia a la compresión según la relación agua/cemento como ajuste al proceso de diseño del ACI 211.1 [1] cuando se utilicen cementos tipo MM/B (P-C)-28

$$f'c = -83,6 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) + 77,9 \text{ [MPa]} \quad f'c = -853 \cdot \left(\frac{a}{c}\right) + 794,0 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad (1)$$

- Las ecuaciones teóricas establecidas en el código de diseño ACI 318S-19 para la determinación del módulo de elasticidad del concreto subestiman los valores experimentales obtenidos en esta investigación en un promedio de 25%.
- Los concretos presentan valores de módulo de elasticidad más altos si son producidos con agregados de tajo en comparación a los producidos con agregados de río.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica, sin el cual este tipo de aportes a la comunidad técnica nacional no hubiese sido posible.

REFERENCIAS

- [1] American Concrete Institute (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). Michigan. Estados Unidos.
- [2] Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2016). INTE C18; Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio (norma idéntica a la ASTM C192). Quinta edición. San José, Costa Rica.
- [3] American Society for Testing and Materials (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (ASTM C78/C78M-18). Pensilvania. Estados Unidos.
- [4] American Society for Testing and Materials (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469/C469M-14). Pensilvania. Estados Unidos.
- [5] American Society for Testing and Materials (2017). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C496/C496M-17). Pensilvania. Estados Unidos.
- [6] Instituto de Normas técnicas de Costa Rica. (2018). INTE C15; Agregados para concreto. Requisitos (norma idéntica a la ASTM C33). Segunda edición. San José, Costa Rica.

- [7] Ministerio de Economía, Industria y Comercio de Costa Rica y Ministerio de Salud de Costa Rica. (2017). Decreto Ejecutivo N° 39414. Reglamento Técnico RTCR 479:2015 Materiales de Construcción, Cementos Hidráulicos.

Comparación de los criterios de falla para fatiga: caso mezcla asfáltica en Costa Rica

Comparison of failure criterion for fatigue: asphalt mix case in Costa Rica

Ing. Francisco Fonseca Chaves, MBA
Auditor Técnico, Unidad de Auditoría Técnica del Lanname, UCR
e-mail: francisco.fonseca@ucr.ac.cr

Brandon Herrera Jiménez
Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil,
Asistente, Unidad de Auditoría Técnica del Lanname, UCR
e-mail: brandon.herrera@ucr.ac.cr

Palabras clave:

ASFALTO, criterio, falla, fatiga, mezcla.

Keywords:

ASPHALT, criterion, failure, fatigue, mixing.

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en evaluar la capacidad de las mezclas asfálticas para soportar cargas mediante el ensayo de viga a flexo-tracción. El objetivo principal es comparar el criterio de 50 % de rigidez inicial con el de máxima rigidez normalizada y los límites establecidos por la norma CR- 2020 en Costa Rica. La metodología del ensayo se basa en pruebas de deformación sinusoidal para determinar la cantidad de repeticiones necesarias para la falla por fatiga. Las muestras analizadas se ensayaron usando la norma AASHTO T-321 con los criterios de falla previamente mencionados. Los resultados indican que no existe una correlación clara entre ambos criterios y los límites establecidos por la norma CR-2020, sin embargo, si se determinó que la prueba de rigidez normalizada arroja resultados con mayor cantidad de repeticiones de carga. Finalmente, el ensayo de fatiga es crucial para la evaluación de la capacidad de las mezclas asfálticas a largo plazo. Es necesario seguir investigando con el fin de determinar la viabilidad de pasar al criterio de rigidez normalizada para ser utilizado en las especificaciones actuales.

ABSTRACT

The present study focuses on the evaluation of the load-bearing capacity of asphalt mixtures by conducting flexure and tensile beam tests. The main objective is to compare the criterion of 50% initial stiffness with that of maximum normalized stiffness and the limits established by the CR- 2020 standard in Costa Rica. The methodology is based on sinusoidal strain tests to determine the number of repetitions required for fatigue failure. The analysed samples were tested using the AASHTO T-321 standard with the previously

mentioned failure criteria. The results indicate that there is no clear correlation between both criteria and the limits established by the CR-2020 standard, however, it was determined that the standardized stiffness test yields data with a greater number of load repetitions. Finally, the fatigue test is crucial to evaluate the long-term capacity of asphalt mixtures. Further research is need to determine the feasibility of adopting the standard stiffness criterion to be used in current specifications.

I. INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las carreteras de alto volumen de tránsito la estructura de pavimentos está compuesta por una capa superior de mezcla asfáltica diseñada para resistir la deformación permanente y una capa intermedia, a veces llamada capa base, la cual debe diseñarse para poder resistir el agrietamiento por fatiga que inducen las cargas repetitivas de los automóviles y las condiciones ambientales como la temperatura. Debido a lo anterior, se deben caracterizar las mezclas mediante ensayos de desempeño para poder establecer si la mezcla asfáltica diseñada cumple para las condiciones a las que va a ser sometida durante la vida útil de la misma.

Existen dos modos de fallas de las capas asfálticas: agrietamiento por fatiga y ahuellamiento. En el caso del agrietamiento por fatiga, las pruebas más comunes para predecir la vida útil de una mezcla asfáltica son: la viga de flexión y el ensayo de fatiga por flexo-tracción, estos ensayos se hacen para medir el módulo y la deformación por tracción por cada ciclo de carga y frecuencia [7]. Estas pruebas se realizan para evaluar si la vida estimada del pavimento será menor o no que el total de repeticiones previstas durante su periodo de diseño.

En Costa Rica se ha usado un criterio de falla estandarizados desde el 2003, que es el criterio de falla del 50% de reducción en la rigidez inicial (RI), con lo que especifica American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en la norma T321-03, sin embargo, la norma ha evolucionado y actualizando sus criterios de fallas. Esta norma fue actualizada en el 2014 para añadir un criterio más a la norma que fue el criterio de máxima rigidez normalizada (RN), finalmente en el 2017, el criterio de falla de RI fue eliminada de la norma y se dejó solamente el RN. Es necesario comprender que la prueba de flexo-tracción posee algunas ventajas sobre otros ensayos pues permite determinar modelos sencillos de predicción de fatiga, los cuales de acuerdo con [7] representan modelos confiables para evaluar dicho fenómeno y para los cuales se ha encontrado una correlación alta con el desempeño en campo.

Por este motivo, la etapa inicial de esta investigación consiste en realizar una base de datos con ambos criterios para tener datos comparativos, en vista que, la norma ha evolucionado a un nuevo criterio y es necesario ir generando resultados con el criterio de RN y así poder evaluar si el país puede emigrar al criterio de falla más actualizado. El objetivo principal de esta investigación es analizar las variaciones entre los criterios y determinar si existe alguna correlación entre ambos criterios.

II. METODOLOGÍA

Para este estudio se analizaron tres diferentes proyectos para considerar los diferentes tipos de mezcla que se usan en Costa Rica actualmente. La base de datos con la que se trabajó contiene un

total de 69 datos. Para este estudio solo se consideraron los resultados que contaban con los dos diferentes tipos de criterios de falla que existen actualmente. A partir de esto, se hizo un análisis con todos los datos disponibles y además, un análisis únicamente con los datos que cumplían con los criterios de granulometría, volumetría o contenidos de asfalto definidos en el CR-2020.

Para la determinación de la cantidad de repeticiones para la falla por fatiga de una mezcla asfáltica, se emplea la metodología ensayo AASHTO T321. Esta norma se somete un espécimen prismático a un proceso de carga y descarga (carga repetitiva) en cuatro puntos diferentes que permite simular la tensión que sufre la carpeta asfáltica. La prueba que se realiza es una prueba de deformación sinusoidal, esta prueba consiste en deformar la barra hacia arriba y hacia abajo del eje neutro de la viga, además, se realizan con frecuencias entre 5 a 10 Hz.

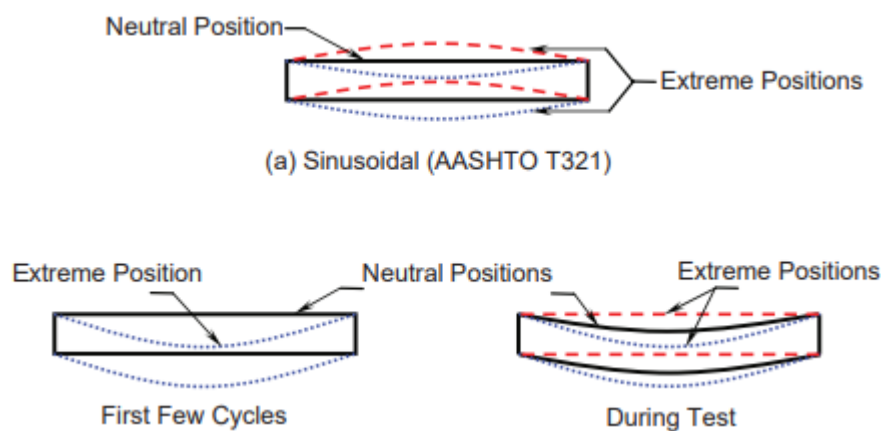


Fig. 1. Posición neutra y extrema de prueba de deflexión sinusoidal. Fuente (Witezak et al., 2013).

CUADRO I.
REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Parámetro	Requisitos mezclas			Método de ensayo
	Tipo AB	Tipo C	Tipo D	
Fatiga a flexotracción para las siguientes deformaciones unitarias(ciclos de carga): (4)	-			AASHTO T 321
400 μm	-	≥ 450000	≥ 300000	
600 μm	-	≥ 50000	≥ 25000	

FUENTE: (CR-2020)

Debido a que las muestras pueden tener una variabilidad alta en los datos, el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puente de Costa Rica (CR-2020) solicita un mínimo de 4 vigas que deben tener una serie de requisitos específicos como vacíos, dimensiones, entre otros. En el CUADRO I, se adjuntan los requisitos solicitados

para mezclas asfálticas tipo C (capa intermedia) y D (capa de rodadura) en cuanto a fatiga. Estos límites están definidos para el criterio de RI.

Para poder definir las repeticiones de carga se debe proceder a determinar un criterio de falla. El criterio de falla por fatiga es una relación del número permitidos de repeticiones de carga con la deformación unitaria por tracción hasta que los especímenes se considera totalmente en estado de deterioro, como para establecer su vida útil. Los dos criterios de falla utilizados en esta investigación se detallan a continuación:

A. Prueba 50% de rigidez normalizada

Según [1] este criterio se basa en el ciclo de carga en el cual el espécimen alcanza una reducción del 50 % de la rigidez a flexión inicial. Para aplicar este criterio, se debe seleccionar la deformación inicial deseada entre 250 a 750 micro-deformaciones, la frecuencia de la carga y el ciclo de carga. A la hora de aplicar los 50 ciclos de cargas a una deformación de 250 a 750 micro-deformaciones la rigidez es una estimación de la rigidez inicial, que se utiliza como referencia para la determinación de la falla del espécimen, entonces el nivel de deformación que la muestra experimenta tiene que ser un mínimo de 10.000 ciclos de carga antes de que su rigidez se reduzca al 50 % o más, antes que presente el fallo de la probeta. Al aplicar los 10.000 ciclos se asegura que el espécimen no disminuya la rigidez demasiado rápido. Entonces cuando el espécimen ha experimentado mayor del 50 % de reducción en la rigidez inicial se termina la prueba.

B. Prueba máxima rigidez normalizada

El RN es el ciclo de carga en el cual se da un máximo en el gráfico de estandarización de la rigidez multiplicada por el número de ciclos en función de los ciclos de carga, que es un indicativo en la deformación de las grietas en los especímenes. Para cada ciclo de carga, este criterio se debe recopilar los datos y calcular el producto de la rigidez a la flexión y el ciclo de carga (S_{xn}) y el criterio determina que la prueba después de un punto en el que S_{xn} calculado se haya reducido de un valor máximo en un 15 % se ha presentado la falla en el espécimen por ende la prueba concluye. [2]

III. RESULTADOS Y DISCUSION

En esta investigación se realizaron vigas de mezcla asfáltica producida en planta para poder realizar el ensayo de fatiga a deformación controlada mediante los criterios de falla RN y RI. Las mezclas fueron analizadas con los criterios de capa base y capa de rodadura. Este tipo de falla se realizó para dos niveles de deformación unitaria a saber, 400 μm y 600 μm según lo indica la especificación vigente en Costa Rica. Finalmente se realizaron dos tipos de análisis uno para las muestras en las que se contaba con los dos criterios de falla y otro con aquellas que aparte de contar con los dos criterios de falla no presentaban incumplimientos en los parámetros de volumetría y granulometría.

A. Muestras que cuentan con los dos criterios de falla

A partir de los resultados de los ensayos realizados a las vigas flexo-tracción con los dos criterios de falla se puede ver que, para las muestras asociadas a la capa de rodadura, tanto para del criterio RI como para el criterio de RN, en 400 μm hay cumplimiento de la especificación en más de un 50%, por lo contrario, vemos que para 600 μm , pasan más del 50 % de las pruebas con el criterio de RN y para RI pasan menos del 20%.

En cuanto a las pruebas que se realizaron a la capa base (especificación más exigente), se puede observar el mismo patrón que la capa de rodadura, en el sentido de que existen mayores incumplimientos con RI que con el criterio RN. Adicionalmente, se puede observar que para las pruebas del RI a 400 μm difieren con respecto a las realizadas a 600 μm con el mismo criterio, ya que para 600 μm solo pasa un 2 % de las pruebas en contra posición a las de 400 μm las cuales tiene un cumplimiento de 55 %.

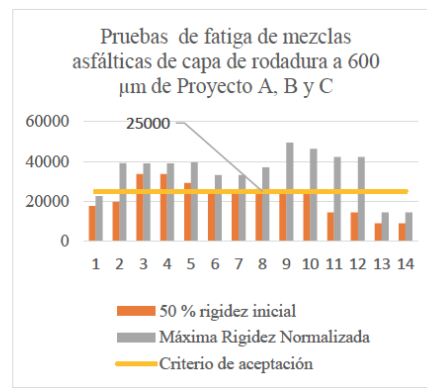
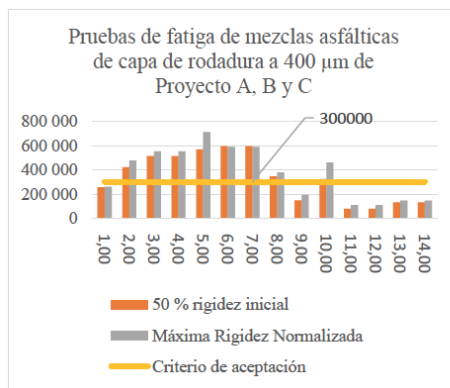


Fig. 2. Pruebas de fatiga Capa de Rodadura a 400 μm . Fig. 3. Pruebas de fatiga Capa de Rodadura a 600 μm .

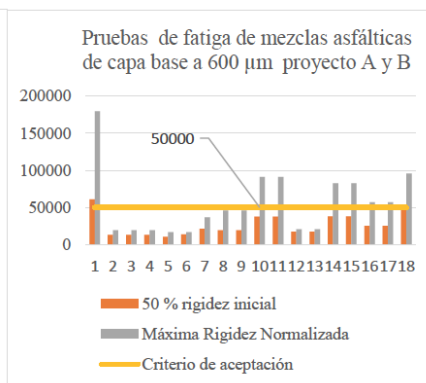
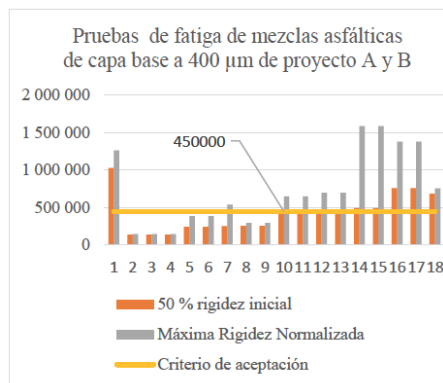


Fig. 4. Pruebas de fatiga capa base a 400 μm de. Fig. 5. Pruebas de fatiga capa base a 600 μm de.

Para las muestra de capa de rodadura, la prueba con el criterio de RN, tiende a dar un valor de fatiga más alto que con el criterio de RI, esto se puede deber a que la prueba de RI se configura para que se detenga en una determinada cantidad de ciclos, mientras que para la RN no sucede

así, ya que este criterio detiene la prueba cuando la rigidez es un 15 % menor a un punto máximo. [2] Debido a esto es importante escoger el criterio falla adecuado, ya que si se usa la norma más actualizada se puede obtener valores mayores usando el criterio RN, que es diferente al que está actualmente normado en el manual CR-2020.

Para la capa base, se puede observar el mismo patrón, es decir, que con el criterio de RN la cantidad de repeticiones por fatiga es mayor que con el criterio de RI, sin embargo, se puede ver que la cantidad de muestras que pasan la especificación para esta capa base es menor que para una capa de rodadura, esto porque la capa de rodadura se diseña para soportar menos fatiga que la capa base de una carretera. Por eso los límites establecidos por el CR-2020 son menores para la capa de rodadura.

B. Muestras que cumplen granulometría y volumetría

Para esta parte se tomaron solo las muestras que cumplían con la granulometría y volumetría establecidos por CR-2020, se utilizaron 3 ensayos que cumplían para la capa de rodadura y 6 datos para la capa base. Para las capas (base y de rodadura) el que tiene mayor cumplimiento con los criterios de CR-2020, son los que se ensayaron para $400 \mu\text{m}$, donde se tiene que más de 50 % de las muestras, pasaron con lo establecido por CR-2020, pero para el $600 \mu\text{m}$ no se cumple para ambas capas con el criterio de RI, esto se puede deber a que la prueba de $600 \mu\text{m}$ es más severa que la de $400 \mu\text{m}$, además, se le suma que la prueba de RI da como un valor menor al de la RN.

También se pudo determinar que la variabilidad de los ensayos es menor con respecto a las muestras que no cumplen uno o más datos de granulometría y volumetría, esto es de esperar ya que son mezclas que presentan mejor control en su producción. Es de esperar que estos datos sean más constantes que con las pruebas que no cumple con los requisitos de granulometría y volumetría, sin embargo, se puede seguir viendo que con el criterio de RN las repeticiones de carga son mayores que con el criterio de RI.

De la misma manera, se puede observar el mismo patrón que en los análisis de los puntos anteriores, sin embargo, se puede ver que las pruebas de $600 \mu\text{m}$, tanto para RI como para RN, la mayoría de los datos de la capa base no pasan el límite establecido por CR-2020 y sí se observan datos que superan el límite con el criterio de RN a $400 \mu\text{m}$ en la capa base. Dicho lo anterior, se puede decir que no se puede determinar si existe o no relación entre la granulometría y volumetría con los límites de CR-2020, ya que existen pocos datos para dar un resultado más aceptado entre ambos criterios.

CONCLUSIONES

Es importante recalcar que este es un primer paso para comparar los dos criterios de falla para Costa Rica, es necesario seguir realizando estos ensayos para poder aumentando el número de datos disponibles para obtener base de datos más robustas para valorar futuras modificaciones a la especificación. Esto en aras de definir el criterio más conveniente para el país.

Con este primer análisis se pudieron observar los siguientes patrones:

1. Con el criterio de la RN las repeticiones de carga son mayores que con el criterio de RI, estos resultados fueron consistentes tanto para las muestras de mezclas asfálticas de capa base y capa de rodadura;
2. De los datos analizados para 600 μm de RI para las mezclas asfálticas usadas como capa base solamente el 2 % cumple con la especificación del CR-2020. Con el criterio RN las mezclas de capa base obtienen un 33 % de cumplimiento. Esto refuerza la importancia de escoger el criterio de falla adecuado según lo especificado en los documentos contractuales.
3. No existe correlación entre el cumplimiento de granulometría y volumetría con los límites establecidos por CR-2020, sin embargo, por los escasos datos que se tiene en la actualidad no se puede determinar si existe o no una relación entre el cumplimiento de granulometría y volumetría y los límites establecidos por CR-2020, lo que se puede determinar es que las muestras tienen una variabilidad menor que con las muestras que presentan algún incumplimiento de uno o más criterios de volumetría y granulometría.

AGRADECIMIENTOS

Agradecerle al Laboratorio de Infraestructura Vial de Lanamme-UCR por el muestreo y la elaboración de los ensayos de mezcla asfáltica. Así como la implementación del criterio de falla de máxima rigidez normalizada, ya que sin esto no se pudo llevar a cabo esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] AASHTO T 321-14, “Standart Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected To Repeated Flexural Bending” Standard Specification, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.
- [2] AASHTO T 321-17, “Standart Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected To Repeated Flexural Bending” Standard Specification, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2017.
- [3] B.P. Jamison, “Laboratory Evaluation of Hot-Mix Asphalt Concret Fatigue Cracking Resistance”, thesis, 2010.
- [4] MOPT, “Pavimentos Asfálticos y Tratamientos Superficiales”, Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puente de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2020.
- [5] M. K. Mora Valverde, J. P. Aguiar Moya, M. Jiménez Acuña y W. Sequeira Rojas, “Análisis de la variabilidad asociada a ensayos de fatiga en mezclas asfálticas”, *Infraestructura Vial*, vol. 23, n.º 41, pp. 20–30, febrero de 2021
- [6] M. Witzak, M. Mamlouk, M. Souliman y W. Zeiada, Laboratory Validation of an Endurance Limit for Asphalt Pavements. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013.
- [7] S. Montazeri, “Assessing repeatability of four-point bending method for estimating fatigue cracking of hot mix asphalt”, To access this resource online via ProQuest Dissertations and Theses @ UTEP, 2009

Mezclas para coronamiento de especímenes de bases estabilizadas para ensayo de resistencia a compresión

Mixes trial for capping cement stabilized specimens for compression strength test

Ana Lorena Monge Sandí

Coordinadora, Programa de Ingeniería Geotécnica, Lanamme, UCR

e-mail: ana.mongesandi@ucr.ac.cr

Andrea Ulloa Calderón

Jefe, Laboratorio de Técnicas de Preservación, Lanamme, UCR

e-mail: andrea.ulloacalderon@ucr.ac.cr

Oscar Valerio Salas

Jefe, Laboratorio de Geotecnia, Lanamme, UCR

e-mail: oscar.valerio@ucr.ac.cr

Palabras clave:

BASES ESTABILIZADAS, coronamiento, curado, falla, resistencia a la compresión, planicidad.

Keywords:

CAPPING, stabilized base, compressive strength, curing, failure, flatness.

RESUMEN

Las bases estabilizadas con cemento han mostrado ser una alternativa importante para la construcción de pavimentos. Sin embargo, los procedimientos de muestreo y ensayo en campo y laboratorio de las bases estabilizadas aplicados en Costa Rica muestran algunas desviaciones dificultando la comparación de resultados. Uno de estos es el ensayo de resistencia a la compresión, ya que no se realiza la verificación de la planicidad de los mismos y no se fabrican coronamientos para que se cumpla con tal parámetro.

Por ello, en esta investigación se plantea el análisis de 4 diseños de mezcla de coronamiento que pueden resultar adecuados preparando especímenes y cumpliendo la planicidad requerida, utilizando los mismos principios establecidos por la norma INTE C16 [12] (ASTM C617 [8]).

ABSTRACT

Cement-stabilized bases have shown to be an important alternative for the construction of pavements. However, the procedures for sampling and field and laboratory testing of the stabilized bases applied in Costa Rica exhibit some deviations, making it difficult to compare results. One of the tests is the compression strength test since the verification of their flatness is not carried out and no copings are manufactured to comply with this parameter.

Because of that, this research proposes the analysis of 4 capping mixture trial that may be adequate preparing specimens and complying with the required flatness, using the same principles established by the INTE C16 [12] (ASTM C617 [8]) standard.

I. INTRODUCCIÓN

Al momento de realizar ensayos de resistencia o capacidad de carga en especímenes de cualquier tipo de material, uno de los aspectos más importantes a verificar es que la zona donde se está aplicando la carga en el espécimen, esté constituida por una superficie plana, uniforme y libre de imperfecciones, que permita la transmisión de la carga de la manera más homogénea posible, desde la máquina de ensayo hasta el espécimen. Es por ello que los ensayos para determinar la resistencia a la compresión de un material, los métodos indican que se debe realizar la revisión de las superficies transversales de ambos extremos del espécimen para verificar que cumplan el requisito de planicidad, además de verificar que las superficies no posean protuberancias o depresiones que no permitan contar con una superficie uniforme.

En esta investigación, se plantea el objetivo de estudiar el comportamiento de cuatro diseños de mezcla para el coronamiento de especímenes de base estabilizada, utilizando una base estabilizada cuyo diseño cumpla con de las especificaciones del “CR-2020 [17]: Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes” para este material y los principios de la norma “INTE C16 [12] Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada” para la aceptación de las coronas.

II. METODOLOGÍA

Para esta investigación se plantea una metodología que consta de 5 fases.

A. *Fase 1: Investigación bibliográfica y recolección de información existente*

Se revisaron las siguientes normativas:

4. ASTM D1632 [10] “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory”
5. ASTM D1633 [11] “Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil- Cement Cylinders”
6. CR-2020 [17] “Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes”
7. INTE C16 [12] (ASTM C617 [8]) “Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada”

B. *Fase 2: Muestreo y caracterización de materia prima*

Se cuenta con dos tipos de materia prima: una es el material de base a ser estabilizado para generar los especímenes de ensayo para fallar a compresión, que es un agregado procedente del Tajo Guacalillo en Alajuela y el otro es el material de coronamiento del cual se establecieron 4 mezclas a ser analizadas. Los ensayos que se realizan a este material son los siguientes:

1. Análisis granulométrico (INTE C46 [13]/ASTM C136 [7])

2. Material más fino que el tamiz No.200 (INTE C49 [14]/ASTM C117 [6])
3. Límites de Atterberg (AASHTO T89 [1] y AASHTO T90 [2])
4. Próctor modificado (AASHTO T180 [4])

Para el material para el coronamiento, se utiliza cemento tipo MP-A-AR, el cual muestra características de alta resistencia temprana según la norma INTE C147 [16] y el yeso de alta pureza producido en Costa Rica. Para establecer las 4 mezclas utilizar como corona se realizan ensayos de resistencia a la compresión de cubos según la norma INTE C57 [15] (ASTM C109 [5]). La resistencia meta establecida para estas mezclas es de al menos 4,0 MPa.

C. Fase 3: Elaboración de diseños de mezcla para la base estabilizada

Para esta investigación, el diseño de mezcla se concentra en el diseño de la base estabilizada con cemento para que cuente con una resistencia a los 7 días cercana al promedio establecida en las especificaciones del CR-2020 [17], de 3,0 MPa, con un límite inferior de 2,1 MPa y uno superior de 3,9 MPa. El diseño de mezcla de la base estabilizada con cemento se realiza con 3 contenidos de cemento para contar con resistencias por debajo y encima del valor meta. El moldeo de los especímenes se realiza colocando el material en 5 capas y compactar con el mazo de próctor modificado.

D. Fase 4: Evaluación del desempeño del material

El desempeño del material se mide realizando el ensayo de resistencia a la compresión realizado con el método escrito en la norma ASTM D1633 [11]. Se ensayaron 15 especímenes por mezcla de coronamiento mencionada anteriormente (4 mezclas), y los resultados se comparan con 15 especímenes patrón, que cumplen con la especificación de planicidad indicada en la norma ASTM D1632 [10].

Los parámetros de evaluación del desempeño del material se describen a continuación

1. La resistencia a la compresión promedio de 15 especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser menor que el 98% de la resistencia promedio de los 15 especímenes patrón, no coronados y que cumplen con el requisito de planicidad
2. La desviación estándar de los especímenes coronados (con un tipo de material y una dosificación dada), no debe ser mayor que 1,57 veces que la desviación estándar de los especímenes de referencia o patrón
3. Que el espesor de la capa del coronamiento cumpla con 6 mm como valor máximo del promedio de las mediciones y 8 mm máximo por cada medición de coronas individual

E. Fase 5: Análisis de resultados

A partir de estos análisis se establecen las proporciones adecuadas para los coronamientos que cumplen el requisito de planicidad.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos de la ejecución de las fases 2 a la 4 se presentan a continuación.

A. Resultados de la fase 2:

Caracterización del material para la base y para mezclas de coronamiento Los resultados de la ejecución de los 4 ensayos realizados al material de base y descritos anteriormente se resumen en los CUADROS I y II, y en la Fig.1:

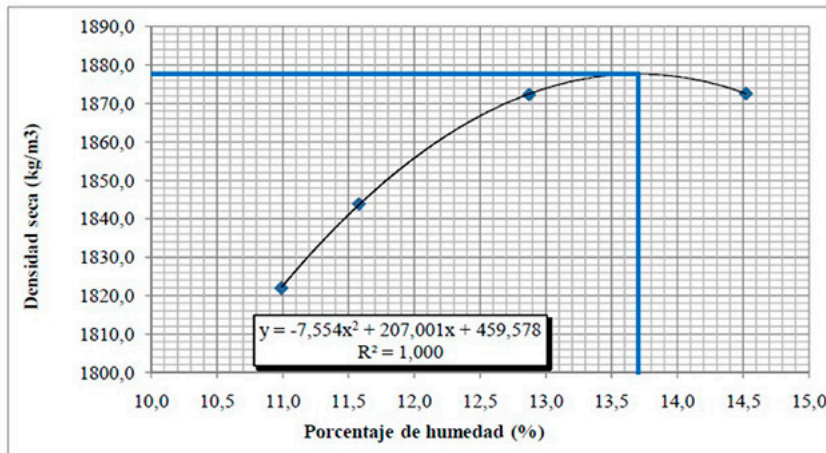
CUADRO I.
GRANULOMETRÍA Y MATERIAL MÁS FINO QUE EL TAMIZ N°200.

MASA INICIAL		8872,0		MASA FINAL		8250,0	
TAMIZ	ABERTURA	MASA RET.	%RET.	%RET. AC.	% PAS.		
No	(mm)	(g)					
2 1/2"	63,0	0,0	0	0	100,0		
2"	50,0	0,0	0	0	100,0		
1 1/2"	37,5	0,0	0	0	100,0		
1"	25,0	240,8	2,7	2,7	97,3		
3/4	19,0	716,8	8,1	10,8	89,2		
1/2"	12,5	1022,4	11,5	22,3	77,7		
3/8"	9,50	699,4	7,9	30,2	69,8		
1/4"	6,3	1281,9	14,4	44,6	55,4		
N° 4	4,75	1014,9	11,4	56,1	43,9		
N° 8	2,36	1364,9	15,4	71,5	28,5		
N° 10	2,00	207,0	2,3	73,8	26,2		
N° 16	1,18	482,6	5,4	79,2	20,8		
N° 20	0,85	252,0	2,8	82,1	17,9		
N° 30	0,600	223,7	2,5	84,6	15,4		
N° 40	0,425	176,4	2,0	86,6	13,4		
N° 50	0,300	170,4	1,9	88,5	11,5		
N° 60	0,250	81,5	0,9	89,4	10,6		
N° 100	0,150	154,4	1,7	91,2	8,8		
N° 200	0,075	145,1	1,6	92,8	7,2		
% LAVADO DE MAYO # 200							7,0

CUADRO II.
ÍMITES DE ATTERBERG.

Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP)
68	48	19

Como puede observarse, los valores de los límites cumplen con lo indicado en las especificaciones del manual CR-2020 [17], no así para la granulometría pues los tamices N°4 y N°40 no cumplen con los requisitos. Sin embargo, al observar que la desviación no es tan significativa, se procede a realizar los especímenes. El ensayo de próctor tiene un comportamiento adecuado para usarse como material para la base estabilizada.



Densidad seca (Kg/m³)	Humedad %
1822,0	11,0
1872,3	12,9
1872,6	14,5
1843,9	11,6

Densidad máxima seca (kg/m³)
1877,7
Humedad óptima (%)
13,7

Fig. 1. Resultado del ensayo próctor al material de base.

En cuanto a los resultados de los diseños de mezcla para el coronamiento, se ensayaron 19 mezclas en total. Las mezclas que presentaron mayor resistencia a la compresión son las que se muestran en el CUADRO III, que como se puede observar cuentan con resistencias incluso mayores al valor meta de 4,0 MPa establecido para estas mezclas.

CUADRO III.
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS
MEZCLAS PARA CORONAMIENTO.

Mezcla	Proporción		Relación	
	Cemento	Yeso	A/(C +Y)	(PMa)
12	1,00	1,00	0,45	5,15
17	-	1,00	0,50	9,73
18	1,00	2,00	0,50	6,29
19	1,00	2,00	0,45	7,57

B. Resultados de la fase 3: diseño de mezcla de la base estabilizada

Con respecto a la base estabilizada, se realizaron especímenes con un contenido de cemento de 1%, 3% y 5% con la premisa de obtener una resistencia a la compresión simple de 3,0 MPa a los 7 días.

Los resultados se muestran en la Fig. 2, y con base en ellos se determina que los especímenes de base estabilizada se realizarán con un 2% de contenido de cemento:

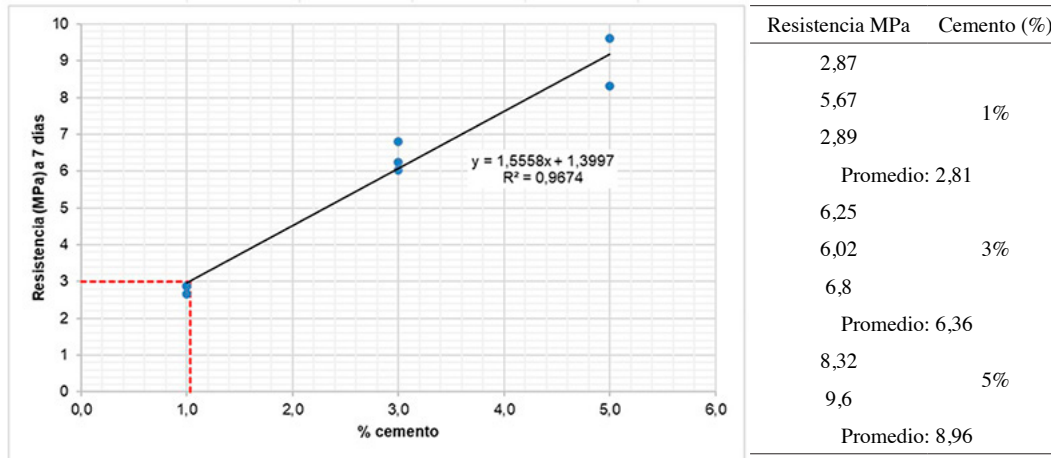


Fig.2. Obtención de proporción óptima para la BE.

C. Fase 4: Desempeño de los diseños de mezcla

Por último, se ensayan los 4 tipos de mezcla con los coronamientos indicados en el apartado III.A, obteniéndose los resultados de la resistencia, espesor de coronas, densidad, contenido de humedad en el moldeo y el contenido de humedad en la falla se muestran en el CUADRO IV:

De este análisis se deriva que los 4 diseños de mezcla de las coronas elegidos cumplen con los requisitos establecidos, reflejando que es posible encontrar mezclas que generen resultados favorables para ser utilizadas como coronamiento con la materia prima seleccionada.

En la Fig. 3 se observa la posible influencia de las propiedades determinadas de los especímenes sobre la resistencia a la compresión. Se infiere que no existe una tendencia clara de la influencia.

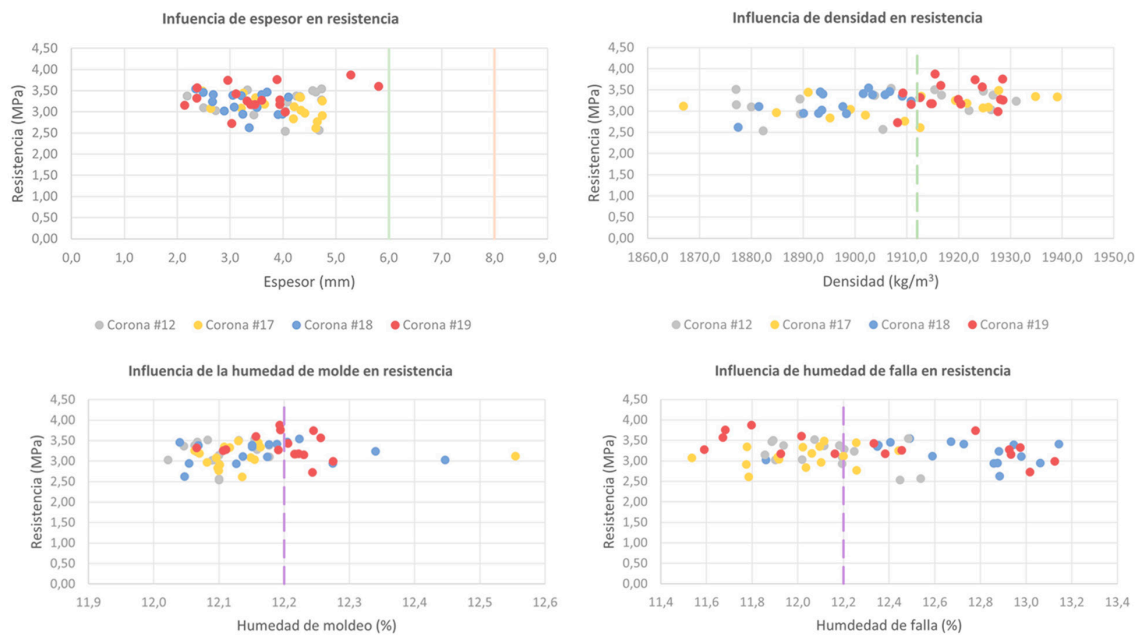


Fig. 3. Verificación de la influencia de propiedades de la base estabilizada sobre la resistencia.

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos, es posible obtener las siguientes conclusiones:

1. Es viable contar con especímenes que cumplan la planicidad sin requerir coronamiento, realizando un acabado con ayuda de material más fino que el tamiz #4 en la superficie.
2. Es posible contar con diseños de mezcla de coronas que cumplen con los requisitos de la norma INTE C16 [12] (ASTM C617 [8]) sin afectar significativamente los resultados de la resistencia requerida por el diseño de mezcla de la base estabilizada.
3. Los parámetros evaluados en esta investigación de espesor de la corona, densidad del espécimen, humedad durante el moldeo y humedad durante la falla, no afectan significativamente los resultados de resistencia a la compresión de las bases estabilizadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los integrantes de la Comisión de Bases Estabilizadas con Cemento del LanammeUCR por su apoyo en el desarrollo de esta investigación: Tania Ávila, Gustavo Badilla, Tracy Gutiérrez, Mauricio Salas, Wendy Sequeira.

REFERENCIAS

- [1] AASHTO T 89, *Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils*, AASHTO. Washington D.C., Estados Unidos: 2022.
- [2] AASHTO T90, *Standard Method of Test for Determining the Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*, AASHTO. Washington D.C., Estados Unidos: 2022.
- [3] AASHTO T134, *Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soil–Cement Mixtures*, AASHTO. Washington D.C., Estados Unidos: 2022.
- [4] AASHTO T180, *Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop*, AASHTO. Washington D.C., Estados Unidos: 2022.
- [5] ASTM C109, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50 mm Cube Specimens)*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos: 2021.
- [6] ASTM C117, *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- [7] ASTM C136, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.
- [8] ASTM C617, *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2015.
- [9] ASTM D558, *Standard Test Methods for Moisture-Density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2019.
- [10] ASTM D1632, *Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.

- [11] ASTM D1633, *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*, ASTM International. West Conshohocken, PA, Estados Unidos, 2017.
- [12] INTE C16, *Coronamiento de especímenes cilíndricos de concreto. Práctica normalizada*, INTECO. San José, Costa Rica: 2017.
- [13] INTE C46, *Análisis granulométrico en tamices de agregado fino y grueso. Método de ensayo*, INTECO. San José, Costa Rica: 2020.
- [14] INTE C49, *Determinación por lavado del material que pasa por el tamiz 75 μm (N° 200) en agregados minerales. Método de ensayo*, INTECO. San José, Costa Rica: 2018.
- [15] INTE C57, *Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico. Usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulgadas). Método de ensayo*, INTECO. San José, Costa Rica: 2022.
- [16] INTE C147, *Cemento hidráulico. Requisitos*, INTECO. San José, Costa Rica: 2021.
- [17] Ministerio de Obras Públicas y Transportes, CR-2020: *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*, MOPT. San José, Costa Rica: 2021.
- [18] SANS 3001-GR51, *Part GR51: Sampling, preparation, compaction and curing of field mixed freshly cementitiously stabilized materials including the determination of the maximum dry density and optimum moisture content*, SABS. Pretoria, Sudáfrica: 2015.

Tratamiento de aguas residuales y modelado hidrometeorológico

Inventario de plantas ornamentales utilizadas en biojardineras en Costa Rica

Ornamental plants inventory used in biogardens in Costa Rica

Ronald Esteban Aguilar Álvarez

Docente e investigador, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, UCR

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

Alison Briceño Cortés

Estudiante, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, UCR

e-mail: alison.briceno@ucr.ac.cr

Jorge Rodríguez Vásquez

Estudiante, Escuela de Ingeniería de Biosistemas, UCR

e-mail: antonio.rodriguezvasquez@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Aguas residuales, Fitorremediación, Humedal artificial, Tratamiento, Trópico.

Keywords:

Constructed wetland, Phytoremediation, Treatment, Tropics, Wastewater.

RESUMEN

Con el fin de mejorar el criterio de selección de plantas ornamentales en biojardineras, el presente trabajo muestra una base de datos única para Costa Rica. El inventario de plantas ornamentales permite determinar cuál o cuáles plantas son las más utilizadas y que han demostrado ser exitosas, desde el punto de vista de establecimiento en las biojardineras, en Costa Rica. La base de datos se realizó como una de las actividades del proyecto C2451 “Sistematización de los humedales artificiales instalados en Costa Rica y evaluación de sustratos alternativos en el tratamiento de las aguas residuales ordinarias”, coordinado por la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica. El inventario consta de 43 distintas especies de plantas ornamentales, producto del levantamiento de 80 biojardineras a lo largo de Costa Rica. El resultado se puede apreciar de manera dinámica en el visor cartográfico llamado “Humedales artificiales de Costa Rica”, que se puede acceder mediante el enlace <https://tinyurl.com/2zshehcx>, en el cual se puede observar las plantas identificadas por biojardinería. El visor cartográfico, con su base de datos, se convierte en una herramienta que facilita la selección de plantas ornamentales para futuras biojardineras.

ABSTRACT

To improve the criteria for selecting ornamental plants in biogardens, this work presents a unique database for Costa Rica. The ornamental plants inventory demonstrates which plants are the most used and which have

proven to be successful, from the point of view of establishment in biogardens, in Costa Rica. The database was carried out as one of the activities of the project C2451 Systematization of artificial wetlands installed in Costa Rica and evaluation of alternative substrates in the treatment of ordinary wastewater, coordinated by the School of Biosystems Engineering of the University of Costa Rica. The inventory consists of 43 different species of ornamental plants in the 80 biogardens that were found throughout Costa Rica. The result can be seen dynamically in the cartographic viewer called "Artificial Wetlands of Costa Rica", which can be accessed through the link <https://tinyurl.com/2zshehkhx>, in which it can be seen the plants identified by biogardens. The cartographic viewer, with its database, becomes a tool that facilitates the selection of ornamental plants for future biogardens.

I. INTRODUCCIÓN

En el 2004, a partir del proyecto de Ecosaneamiento [1], en Costa Rica se promovió la utilización de biojardineras para el tratamiento de aguas residuales ordinarias en hogares, escuelas, hoteles, entre otros. La biojardinera es un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. La adopción de la palabra biojardinera en Costa Rica se debió a un acuerdo con el Ministerio de Salud, de manera que la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en un hogar no se viera limitada por la reglamentación vigente. En el 2016, se establece el Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (39887-S-MINAE, 2016) [2] que exige para la instalación de un humedal artificial, como sistema de tratamiento, una distancia de 20 m con los linderos de la propiedad, lo cual resultaba ilógico por la escala pequeña del sistema con biojardineras. Por ejemplo, la escala de una biojardinera es similar a la que se requiere para la instalación de un tanque séptico y su sistema de drenaje en un hogar.

La biojardinera, como todo humedal artificial, basa el tratamiento de las aguas residuales en tres elementos: el sustrato, los microorganismos, y las plantas. El sustrato sirve de medio de anclaje para las plantas, de área superficial para el crecimiento de microorganismos, permite la adsorción de nutrientes como el fósforo, y funciona como medio filtrante para tratar el agua residual. Los microorganismos son los principales encargados de tratar materia orgánica y nutrientes en el agua residual. Degradan y absorben la materia orgánica en procesos aeróbicos y anaeróbicos, se encargan de los procesos de nitrificación y desnitrificación y algunos son depredadores de patógenos [3] [4]. Las plantas, a través de las raíces, aportan oxígeno a zonas de la rizosfera con el sustrato, lo cual promueve el metabolismo de microorganismos aerobios, y capta nutrientes en sus tejidos [5]. Después de pasar el agua residual por el humedal, los microorganismos aportan en el 95% del tratamiento, mientras que las plantas solo remueven un 5% de los contaminantes que ingresan [6]. Por ejemplo, Venegas [7] obtuvo entre 0,67 % y 6,29% de remoción de carbono, fósforo, y nitrógeno por parte de las plantas evaluadas. Por tanto, las plantas tienen un rol más estético y de promoción de biodiversidad en la zona donde se establece una biojardinera.

En zonas tropicales, la sugerencia de plantas para los humedales artificiales se basa en las prácticas que se han implementado en zonas templadas. Por ejemplo, se recomienda espadaña grande (*Scirpus grossus*), totora (*Typha angustifolia*), y tomillo de agua (*Hydrilla verticillata*), las cuales, para el trópico, son exógenas y no aportan en la estética y biodiversidad del ecosistema [8]. Autores como Nakase et al. [9] recomiendan las plantas ornamentales para las zonas tropicales.

Como factores positivos de incorporar plantas endógenas están la estética del paisaje y aumento de la diversidad. Además, en términos de economía circular, se podría implementar un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales, como un sistema productivo de plantas ornamentales y venta de flores.

En Costa Rica, con base en una previa revisión literaria, se logró evidenciar la utilización de las plantas ornamentales en biojardineras. En dicha revisión, en cuatro de las referencias no se indica el tipo de planta que se utilizó en la biojardinería [10], [11], [12], [13] y [14]. A pesar de no indicar las plantas, los autores destacan el beneficio que ofrece un ambiente con vegetación creado con la biojardinería. Por ejemplo, Cubillo y Gómez [10] mencionan que las plantas en las biojardineras han proporcionado un bienestar mental a las personas responsables del cuidado de estas. En cinco de las referencias, sí se indica el tipo de planta utilizada, y se identificaron 11 plantas ornamentales diferentes, a saber: *Heliconia sp.*, tomates (*Solanum lycopersicum*), y chiles (*Capsicum sp.*) [15]; Papiro (*Cyperus papyrus*) [16]; Cypriol (*Cyperus scariosus*), ginger (*Alpinia purpurata*) [17]; Platanilla (*Canna x generalis*), avecilla (*Heliconia psittacorum*), platanillo (*Heliconia wagneriana*), caña agria (*Costus spicatus*), papiro (*Cyperus involucratus*) [18], y Lágrimas de San Pedro (*Coix lacryma-jobi*) [19]. Se percibe que la selección de plantas fue arbitraria y que se basó en la flora que se encontró cercana al lugar del proyecto. Otras revisiones generales, como las de Vymazal [5] y Zhang *et al.* [20] hacen referencia al trabajo de Dallas *et al.* [19], donde se indica, para Costa Rica, la utilización de lágrimas de San Pedro (*Coix lacryma-jobi*).

Para mejorar el criterio de selección de plantas ornamentales en biojardineras, el presente trabajo muestra una base de datos única para Costa Rica. A través del proyecto C2451 Sistematización de los humedales artificiales instalados en Costa Rica y evaluación de sustratos alternativos en el tratamiento de las aguas residuales ordinarias, financiado por la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, en el 2022, se trabajó en georreferenciar y caracterizar la mayor cantidad de biojardineras ubicadas en Costa Rica. Dentro de la caracterización, se hizo un levantamiento de las plantas ornamentales que han sido utilizadas. Este levantamiento de datos permitirá determinar cuál o cuáles plantas son las más utilizadas y que han demostrado ser exitosas, desde el punto de vista de establecimiento en las biojardineras, en Costa Rica. Además, permitirá iniciar investigación de cuáles son las plantas más apropiadas en el tratamiento de las aguas residuales, desde el punto de vista de desarrollo radicular y de tejidos, dos factores que promueven más desarrollo microbiológico y mayor captación de nutrientes de las aguas residuales.

II. METODOLOGÍA

De marzo del 2022 a abril de 2023, se realizó la colección de datos. Con base en información preliminar de ubicación y persona de contacto donde hay biojardineras instaladas, se establecieron giras a todas las provincias de Costa Rica. En cada gira se georreferenció y caracterizó cada una de las biojardineras visitadas. La georreferenciación se realizó con la aplicación de celular Mobile Topographer (ver. 9.3.2, Copyright © 2012-2016) de libre acceso para Android. La caracterización de cada biojardinería se hizo con un formulario y toma de fotografías de cada sitio visitado. Los datos de cada biojardinería se organizaron en una hoja de Excel de Microsoft. Para cada biojardinería, en la hoja

de Excel, se cuenta con información base como ubicación (provincia, cantón, distrito, coordenadas WGS84 (grados decimales), coordenadas CRTM05 (m)), elevación (msnm), institución/organización/persona de contacto, y teléfono. Además, se incluye información pertinente de la biojardinera como año de construcción, tipo de humedal, tipo de agua residual, material impermeabilizante, vegetación, sustrato, y área de tratamiento. Para identificar las plantas en cada biojardinera visitada, se indagó el nombre común de la vegetación con los usuarios de cada biojardinera y se revisaron guías botánicas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ha logrado georreferenciar 80 biojardineras, principalmente en zonas rurales. El 49% de las biojardineras se ubican en la provincia de Puntarenas. Guanacaste y Alajuela, con 19% y 16%, siguen como las provincias con mayor cantidad de biojardineras instaladas, respectivamente. Cartago, San José, Limón, y Heredia, son las provincias con menor cantidad de biojardineras con 5%, 8%, 3%, y 1%, respectivamente.



Fig. 1. Casos de biojardineras sin plantas.

Se destaca que 17 de las 80 biojardineras no tienen plantas. Ocho de las biojardineras no tienen plantas debido a que los usuarios de las biojardineras decidieron no darle más operación y mantenimiento. Las restantes 9 biojardineras si están en operación. Las principales razones por las cuales no hay plantas en las biojardineras en operación es la falta de adaptación debido a mucha sombra y falta de mantenimiento, ausencia de sombra, toxicidad, y porque el usuario no quiere tener plantas en la biojardinera (Fig. 1). En el caso de exceso de sombra y falta de mantenimiento, la falta de radiación impide el crecimiento de vegetación. Por lo general, la sombra la genera árboles o arbustos en los alrededores de la biojardinera. Al estar cercanos, las hojas y ramas caen en el área de la biojardinera y, por falta de mantenimiento, la hojarasca impide el crecimiento de vegetación (Fig. 1.a). En zonas donde la radiación es considerable, la ausencia de sombra puede generar daños en las plantas al punto de no permitir su establecimiento en una biojardinera (Fig. 1.b). En caso

de que las concentraciones de contaminantes en el agua residual a tratar sean considerables, el establecimiento de las plantas en una biojardinera no se da por toxicidad (Fig. 1.c). Finalmente, la ausencia de plantas se debe porque el usuario no tiene interés de tenerlas en la biojardinera (Fig. 1.d).

A. Inventario de plantas ornamentales utilizadas en las biojardineras

Sesenta y tres de las 80 biojardineras cuentan con plantas ornamentales. Se han identificado 43 distintas especies de plantas ornamentales en las biojardineras (CUADRO I). En el Cuadro I se puede observar la cantidad de plantas identificadas por biojardinera. Por ejemplo, guaria de tierra (*Arundina graminifolia*) es una de las 28 plantas que solo se identificó en una de las 80 biojardineras. Se destaca que las plantas ornamentales de mayor recurrencia en biojardineras son liriotropo (*Hedychium coronarium*), ginger rojo (*Alpinia purpurata*),avecilla (*Heliconia psittacorum*), heliconia (*Heliconia sp.*), y platanilla o sagú (*Canna indica*), que aparecen en un 11%, 15%, 19%, 20%, y 20%, respectivamente, de las 80 biojardineras ubicadas. Por tanto, se recomiendan estas cinco plantas para ser utilizadas en futuras biojardineras sin importar la zona geográfica donde se vaya a ubicar.

CUADRO I.
INVENTARIO DE PLANTAS ORNAMENTALES UTILIZADAS EN LAS BIOJARDINERAS.

<i>Recurrencia de aparición en las biojardineras</i>	<i>Plantas</i>
1/80	Azucena de porcelana (<i>Alpinia zerumbet</i>). Banano (<i>Musa acuminata</i> AAA). Begonia (<i>Begonia sp.</i>). Caña India (<i>Cordyline fruticosa</i>). Chile (<i>Capsicum annum</i>). China (<i>Impatiens hawkeri</i>). Cola de zorro (<i>Pennisetum alopecuroides</i>). Coquito (<i>Molineria capitulata</i>). Crisantemo (<i>Chrysanthemum sp.</i>). Filodendro (<i>Philodendron grandipes</i>). Gladiolo silvestre (<i>Gladiolus sp.</i>). Guaria de tierra (<i>Arundina graminifolia</i>). Guarumo (<i>Cecropia peltata</i>). Iris (<i>Trimezia sp.</i>). Ixora petit (<i>Ixora coccinea</i>). Jalapa (<i>Allamanda cathartica</i>). Lágrimas de San Pedro (<i>Coix lacryma-jobi</i>). Matrimonio (<i>Zinnia sp.</i>). Moisés (<i>Tradescantia spathacea</i>). Morera (<i>Morus alba</i>). Orquídea terrestre (<i>Phaius tankervilleae</i>). Papaya (<i>Carica papaya</i>). Pincel blanco (<i>Dianella tasmanica</i>). Piña (<i>Ananas comosus</i>). Plátano (<i>Musa paradisiaca</i> AAB). Sábila (<i>Aloe vera</i>). Sainillo (<i>Dieffenbachia oerstedii</i>). Uvilla (<i>Cuscuta verticillata</i>).
2/80	Alocasia (<i>Alocasia sp.</i>). Anturio (<i>Anthurium spp.</i>). Árbol (<i>Anthurium spp.</i>). Ave del paraíso (<i>Strelitzia reginae</i>). Cala alcatraz (<i>Zantedeschia aethiopica</i>). Oreja de elefante (<i>Alocasia longiloba</i>).
3/80	Cala (<i>Zantedeschia sp.</i>)
5/80	Caña agria (<i>Costus spicatus</i>). Lotería (<i>Dieffenbachia seguine</i>)
6/80	Lirio rosado o blanco (<i>Lilium sp.</i>)
7/80	Cypriol (<i>Cyperus scariosus</i>)
9/80	Liriotropo (<i>Hedychium coronarium</i>)
12/80	Ginger rojo (<i>Alpinia purpurata</i>)
15/80	Avecilla (<i>Heliconia psittacorum</i>)
16/80	Heliconia (<i>Heliconia sp.</i>). Platanilla o Sagú (<i>Canna indica</i>)

Para facilidad de selección de plantas por potenciales usuarios, en el presente proyecto se ha creado, utilizando la plataforma de My Maps de Google, un visor cartográfico llamado “Humedales artificiales de Costa Rica”, en el cual, se puede observar las plantas identificadas por biojardinera. Por ejemplo, en la Fig. 2 se muestra la información específica para una biojardinera ubicada en Los Tornos, Abangares, Guanacaste. Dicha biojardinera tiene Sainillo (*Dieffenbachia oerstedii*), Caña agria (*Costus spicatus*), y Heliconia sp. El visor cartográfico se convierte en una herramienta de selección de plantas para futuras biojardineras. A través del visor, un próximo usuario o interesado en tratar las aguas con una biojardinera, puede ver qué planta o plantas han sido utilizadas en proyectos cercanos a él. El visor cartográfico se puede acceder mediante el código QR, en la Fig. 2 o mediante el enlace <https://tinyurl.com/2zshehxx>.

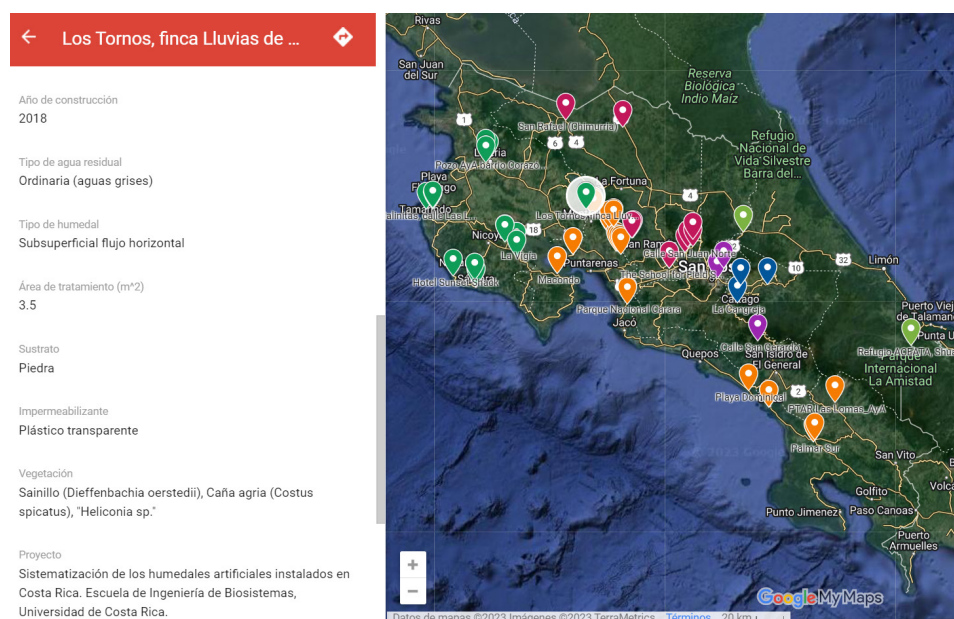


Fig. 2. Ubicación general de las 80 biojardineras instaladas en Costa Rica y despliegue de información por biojardinera utilizando el visor cartográfico Humedales artificiales de Costa Rica.

CONCLUSIONES

Costa Rica tiene la necesidad de ampliar la cobertura en el tratamiento de aguas residuales. Las biojardineras, técnicamente humedal artificial, son una técnica basada en la naturaleza, de bajo costo constructivo y de mínimo mantenimiento. Por dichas características, su implementación se ha mantenido y ha ido en aumento. La pregunta frecuente de ¿cuál planta utilizar?, se puede responder con el inventario y el visor cartográfico que se presentó en este trabajo. Por tanto, con este trabajo se les facilita información valiosa a futuros usuarios de biojardineras. Además, la base de datos permitirá iniciar investigación de cuáles son las plantas más apropiadas en el tratamiento de las aguas residuales, desde el punto de vista de desarrollo radicular y de tejidos, dos factores que promueven más desarrollo microbiológico y mayor captación de nutrientes de las aguas residuales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por financiar, por medio del Fondo Semilla, el presente proyecto. Además, se agradece a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por facilitar que el proceso de investigación se desarrolle según lo planeado. En particular, el proyecto agradece a los colaboradores del proyecto Sisgo Acuña Chinchilla, Matías Chaves Herrera, y Aníbal Torres. Además, se agradece a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas Diego Mora, Jorge Vega, Grattia Corrales, Sofía Solís, y Hazel Quirós, por sus aportes durante sus asistencias.

REFERENCIAS

- [1] E. Rosales-Escalante, «Ecosaneamiento», *Tecnología En Marcha*, vol. 18, n.º 2, pp. 15-25, may 2005, [En línea]. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/204
- [2] Poder Ejecutivo, «Reglamento de Aprobación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales», N° 39887-S-MINAE, 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=82487&nValor3=105490&strTipM=TC
- [3] R. Aguilar, «Engineering in the Tropics: Evaluating a Solar-powered Anaerobic Digestion and Hybrid Constructed Treatment Wetland System to Treat Agricultural Wastes in Costa Rica», Tesis Doctoral, Michigan State University, 2018.
- [4] MONarquitectura y biología, «Los humedales artificiales», *iAgua*, 21 de mayo de 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos>
- [5] J. Vymazal, «Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review», *Hydrobiologia*, vol. 674, n.º 1, pp. 133-156, May 2011, doi: 10.1007/s10750-011-0738-9.
- [6] E. Tousignant, Fankhauser, y Hurd, «Guidance manual for the design, construction and operations of constructed wetlands for rural applications in Ontario», 1999. <http://hdl.handle.net/10214/15203>
- [7] Venegas, «Determinación de los parámetros de un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para la optimización del diseño de modelos de caja negra bajo condiciones tropicales», Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica, 2020.
- [8] Tanaka, Jern, y Jinadasa, *Wetlands for Tropical Applications: Wastewater Treatment by Constructed Wetlands*. World Scientific Publishing Company, 2011. [Ebook Central]. Disponible en: <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p599>
- [9] C. Nakase et al., «Nitrogen Removal from Domestic Wastewater and the Development of Tropical Ornamental Plants in Partially Saturated Mesocosm-Scale Constructed Wetlands», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, n.º 23, p. 4800, nov. 2019, doi: 10.3390/ijerph16234800.
- [10] M. Cubillo y W. Gómez, «Biojardineras como alternativas para el tratamiento de aguas residuales: experiencia en cinco biojardineras en las comunidades de Barra Honda y La Vigía de Nicoya, Guanacaste 1», *Universidad en diálogo*, vol. 7, n.º 1, p. 69, jun. 2017, doi: 10.15359/udre.7-1.4.
- [11] Alfaro y Chavarría, *Beneficios socioambientales obtenidos mediante el manejo de aguas grises domésticas con humedales artificiales*, vol. 4. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10433/5495>

- [12] Rosales-Escalante, «Mejoras sanitarias en instituciones o servicios públicos de La Casona, Coto Brus», *Tecnología En Marcha*, vol. 23, n.º 5, pp. 41-50, 2010, [En línea]. Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/57/56
- [13] M. J. Chassoul y C. Rodríguez-Arias, «Contaminación y disminución del embalse El Laguito, Costa Rica, por aguas urbanas: encuesta y fisicoquímica», *UNED Research Journal*, vol. 10, n.º 2, pp. 409-415, sep. 2018, doi: 10.22458/urj.v10i2.2006.
- [14] M. J. Chassoul-Acosta, «Ecotecnias para el tratamiento de residuos: experiencia de la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica», *Estudios de la Gestión*, n.º 10, pp. 97-114, 2021, doi: 10.32719/25506641.2021.10.5.
- [15] D. Arias-Hidalgo, R. Aguilar-Álvarez, y D. Reinhold, «Prácticas sostenibles de turismo para el tratamiento de aguas y manejo de residuos sólidos en albergues turísticos de Talamanca», *Tecnología en Marcha*, vol. 32, pp. 78-88, abr. 2019, doi: 10.18845/tm.v32i6.4231.
- [16] Pérez, Alfaro, Sasa, y Agüero, «Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales», *Uniciencia*, vol. 27, n.º 1, Art. n.º E- ISSN: 2215-3470, 2013, [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=475947762019>
- [17] C. Alfaro, R. Pérez, y M. Solano, «Saneamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales en el Museo de Cultura Popular de la Universidad Nacional», *Ciencias Ambientales*, vol. 45, n.º 1, ene. 2013, doi: 10.15359/rca.45-1.6.
- [18] Moncada-Corrales, «Evaluación del diseño de una biojardinera de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises en Zapote, San José», Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.
- [19] S. Dallas, B. Scheffe, y G. Ho, «Reedbeds for greywater treatment—case study in Santa Elena-Monteverde, Costa Rica, Central America», *Ecological Engineering*, vol. 23, n.º 1, pp. 55-61, ago. 2004, doi: 10.1016/j.ecoleng.2004.07.002.
- [20] D. Zhang, K. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, S. G. Tan, y W. J. Ng, «Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000–2013) », *Journal of Environmental Sciences-china*, vol. 30, pp. 30-46, abr. 2015, doi: 10.1016/j.jes.2014.10.013.

Evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales con reactor anaeróbico en Costa Rica

Evaluation of anaerobic-based sewage treatment plants in Costa Rica

Erick Centeno Mora

*Docente e investigador(a) Escuela de Ingeniería Civil, UCR;
Investigador, Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES), UCR
e-mail: erick.centenomora@ucr.ac.cr*

Carlos Montero Padilla

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

Steven Sibaja Víquez

Estudiante, Escuela de Ingeniería Civil, UCR

Nidia Cruz Zúñiga

*Docente e investigador(a), Escuela de Ingeniería Civil, UCR
e-mail: nidia.cruz@ucr.ac.cr*

Paola Vidal Rivera

*Docente e investigador(a), Escuela de Ingeniería Civil, UCR;
Investigador(a) Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES), UCR
e-mail: paola.vidal@ucr.ac.cr*

Juan McGregor Sanabria

*Docente e investigador, Escuela de Ingeniería Topográfica, UCR;
Investigador Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible (CIEDES), UCR
e-mail: juan.mcgregor@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES, digestión anaeróbica, estación depuradora, recuperación de subproductos, saneamiento sostenible.

Keywords:

ANAEROBIC DIGESTION, municipal wastewater, product recovery, sustainable sanitation, wastewater treatment plant.

RESUMEN

El tratamiento anaeróbico de aguas residuales ordinarias es ampliamente utilizado en muchos países de América Latina. Sin embargo, su aplicación en Costa Rica ha sido limitada a pesar de sus ventajas sobre tecnologías como los lodos activados. Este artículo evalúa cinco plantas de tratamiento de aguas

residuales ordinarias (PTAR) con reactor anaeróbico en Costa Rica para identificar posibles problemas técnicos y desafíos en su implementación. A pesar de las diferencias entre los sistemas evaluados, el estudio revela problemas consistentes en el cumplimiento de los límites de vertido en tres de las cinco PTARs, así como deficiencias en rendimiento, diseño, construcción y operación en todos los reactores anaeróbicos de las PTARs. Se observó que el monitoreo se centra únicamente en el efluente líquido vertido, sin abordar adecuadamente los aspectos operativos de los reactores anaeróbicos ni considerar opciones de valorización de subproductos generados, como agua, lodo y biogás. El análisis de los resultados de la investigación permitió identificar áreas de capacitación necesarias en la comunidad técnica en el tratamiento anaeróbico de aguas residuales, así como posibles oportunidades adicionales de investigación.

ABSTRACT

Anaerobic treatment of ordinary wastewater is widely employed in many Latin American countries. However, its application in Costa Rica has been limited despite its advantages over technologies like activated sludge. This article evaluates five anaerobic-based sewage treatment plants (STP) in Costa Rica to identify potential technical issues and challenges for their proper implementation. Despite variations among the evaluated systems, the study reveals problems in consistently meeting discharge limits in three out of the five STP. Moreover, deficiencies were observed in performance, design, construction, and operation across all STP. The study highlights a focus on monitoring the discharged liquid effluent, neglecting operational aspects of anaerobic reactors and disregarding options for valorising generated by-products such as water, sludge, and biogas. This analysis enabled the identification of training needs within the technical community regarding anaerobic wastewater treatment and presents potential opportunities for academic research.

I. INTRODUCCIÓN

Según la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales [1], el Estado de Costa Rica tiene la meta de colectar y tratar el 100% de las aguas residuales de las zonas densamente pobladas hacia el año 2035. Esto representa pasar de aproximadamente 15% del agua tratado actualmente en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) [2] a por lo menos 75% en tan solo 12 años, lo que representa un desafío considerable para el país a nivel técnico, administrativo y financiero.

Adicionalmente, con el fin de garantizar la sostenibilidad de las futuras PTAR, es importante seleccionar las tecnologías más adecuadas para el contexto nacional, analizando cada proyecto de forma individual. Según estudios previos [3], en Costa Rica la gran mayoría de sistemas en operación utilizan la tecnología de lodos activados (más del 90%), y un porcentaje modesto (menor a 5%) utiliza tecnologías anaeróbicas para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias. En países tropicales con condiciones similares a las de Costa Rica esta situación es diferente, y las tecnologías anaeróbicas, usualmente reactores anaeróbicos de flujo ascendente y manto de lodo (reactores UASB, por sus siglas en inglés para upflow anaerobic sludge blanket) seguidos por un postratamiento aeróbico son ampliamente utilizados en países como Brasil, Colombia, México y República Dominicana [4]. Los reactores anaeróbicos son una tecnología madura para su aplicación en países de clima caliente, y poseen importantes ventajas sobre los sistemas de lodos activados [5]: menor consumo energético, menor generación de lodo, producción de biogás (el cual es un gas con un elevado potencial energético), no requiere de equipos mecanizados para su operación, entre otros.

Este artículo tiene por objetivo evaluar la situación de diversas PTARs con reactor anaeróbico en operación en Costa Rica, con el fin de contextualizar la situación actual del tratamiento de aguas residuales ordinarias por medio de reactores anaeróbicos en el país e identificar posibles problemas de origen técnico y desafíos para su correcta aplicación en el país. Para esto se evaluaron cinco PTARs de este tipo en escala plena, operadas por entes públicos, analizando aspectos como la calidad del efluente final, elementos de diseño, construcción, operación y mantenimiento del sistema, y gestión de los subproductos generados durante el tratamiento del agua.

II. METODOLOGÍA

A. Descripción de PTAR evaluadas

Las cinco PTAR con reactor anaeróbico consideradas en este estudio pertenecen a zonas residenciales (aguas residuales ordinarias), son operadas por instancias públicas y vierten su efluente en cuerpos receptores. En el CUADRO I se muestran las principales características de cada uno de estos sistemas.

CUADRO I.
DESCRIPCIÓN DE LAS PTAR CON REACTOR ANAERÓBICO
INCLUIDAS EN EL ESTUDIO.

#	Tipo de reactor anaeróbico	Localización	Caudal reportado (m ³ /d)	Proceso de tratamiento	Observaciones
A	Reactor UASB	Santa Ana, San José	340 ± 28	PT: tamiz 4mm y desarenador B: reactor UASB y lodos activados (LA) L: digestor de lodo y lechos de secado	Medición continua de caudal
B	Reactor UASB	Puriscal, San José	24 ± 2,5	PT: rejillas finas y desarenador B: reactor UASB y filtro percolador (FP) L: digestor de lodo y lechos de secado	Postratamiento con filtración profunda
C	Reactor UASB	Aserri, San José	71 ± 39	PT: rejillas finas y desarenador B: Reactor UASB L: digestor de lodo y lechos de secado	Postratamiento del reactor UASB inexistente
D	FAFA	Belén, Heredia	80 ± 23 m ³ /d	PT: rejillas finas y desarenador B: sedimentador digestor y FAFA L: lechos de secado	-
E	FAFA	Cantón central de Alajuela	465 ± 106	PT: rejillas finas y desarenador B: sedimentador digestor y FAFA L: inexistente	Medición continua de caudal

NR: no reportado; UASB: *upflow anaerobic sludge blanket*; FAFA: filtro anaeróbico de flujo ascendente; PT: pretratamiento; B: sistema biológico; L: tratamiento de lodo.

B. Criterios de evaluación

Las PTARs fueron evaluadas según distintos criterios: (i) calidad del efluente según la reglamentación vigente para vertido y reúso[6], con los datos de operación suministrados por las personas operadoras para los años 2020 a 2022; (ii) manejo de la línea de lodo y biosólidos según el Reglamento de manejo y disposición de biosólidos [7]; (iii) manejo de la línea de gases (biogás), verificando el adecuado tratamiento y/o aprovechamiento de este, según la reglamentación vigente [8] y la recomendación de la literatura [9], [10]; (iv) análisis de la capacidad teórica de las unidades y detalles constructivos de los sistemas según el estado del arte [9], [10]; (v) los elementos de operación y mantenimiento de cada PTAR según las recomendaciones de la literatura técnica [9], [10]; y (vi) aplicación de principios de economía circular [11], [12]. Estos criterios fueron analizados en cada una de las PTARs evaluadas, con el fin de identificar elementos y temas a mejorar en estos sistemas, así como identificar posibles necesidades de capacitación en la comunidad técnica nacional.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Calidad de efluente y cumplimiento con la normativa vigente

La Fig. 1 muestra la calidad del efluente para varios de los parámetros de calidad del agua establecidos en la reglamentación vigente [6]. Los parámetros de temperatura y pH no se muestran en esta figura debido a que, para todas las PTAR, se mantuvieron dentro del rango de aceptación (pH entre 6 y 9; temperatura entre 15°C y 40°C).

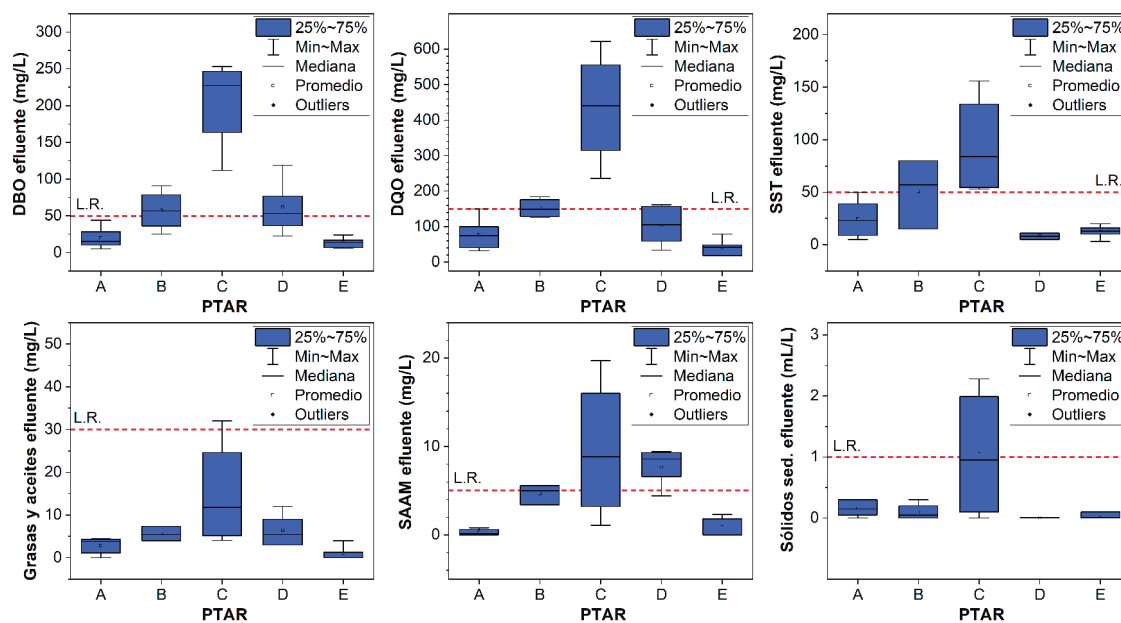


Fig. 1. Concentración de contaminantes en el efluente de las PTAR con reactor anaeróbico evaluadas: (a) Demanda biológica de oxígeno (DBO); (b) Demanda química de oxígeno (DQO); (c) Sólidos suspendidos totales (SST); (d) Grasas y aceites; (e) Sustancias activas al azul de metileno (SAAM); (f) Sólidos Sedimentables.

La Fig. 1 muestra un desempeño heterogéneo para los sistemas evaluados. En el caso de la PTAR A (Reactor UASB + Lodos activados), todos los parámetros de vertido fueron cumplidos en el 100% de los casos. Para la PTAR B (Reactor UASB + filtro percolador), se presentaron dificultades para cumplir con los límites de DBO, DQO, SST y SAAM, mientras que la PTAR C (Reactor UASB sin postratamiento) incumplió prácticamente todos los parámetros de vertido en varias ocasiones (no cumplió ni una vez con los parámetros de DBO, DQO y SST). La PTAR D (FAFA) presentó dificultades para cumplir con los parámetros de DBO, DQO y SAAM, mientras que la PTAR E (FAFA) cumplió con los parámetros de vertido en todos los casos. Es importante mencionar que la literatura [13] indica que los reactores UASB + postratamiento aeróbico (PTAR A y B) tienen capacidad para cumplir con los límites de vertido nacionales, mientras que un reactor UASB por sí solo difícilmente podría hacerlo debido a la presencia de sólidos y materia orgánica en el efluente. Según la literatura, los sistemas FAFA estarían en el límite para el cumplimiento de materia orgánica, aunque su remoción de detergentes (SAAM) es muy limitada [10]. Luego, el rendimiento del sistema C refleja una operación muy por debajo de la capacidad de los reactores UASB, en los cuales concentración de DBO, DQO y SST cercanos a 70-100 mg/L, 180-250 mg/L y 60- 100 mg/L son esperables para el tratamiento de aguas residuales ordinarias [13]. Esto se debe a serios problemas existentes en este sistema, como se verá en las secciones siguientes.

En el caso del sistema E, la calidad del efluente final fue muy superior a lo esperable según la literatura. Al revisar las posibles razones, se pudo notar que el agua afluente a la PTAR estaba muy diluida, posiblemente debido a la entrada de agua subterránea, conexiones ilícitas u otra fuente de dilución. En este caso se registraron valores de DBO, DQO y SST de 45 mg/L, 131 mg/L y 120 mg/L, respectivamente, en un muestreo puntual realizado en época seca. Para el resto de las PTAR las aguas residuales a la entrada de los sistemas presentaron concentraciones típicas para aguas residuales ordinarias. Esto demuestra la importancia de evaluar el desempeño de las PTAR no solamente en función de la calidad del efluente, sino también en relación con la eficiencia de remoción de los contaminantes presentes en el agua cruda, como se hace en muchos otros países [13], [14].

Por último, en el caso de los reactores UASB de las PTARs, se midieron eficiencias de remoción de DQO de 46,0%, 51,7% y 26,6% en los sistemas A, B y C, respectivamente. La literatura [13] indica una eficiencia de remoción de DQO entre 55-70% en reactores UASB que operen en condiciones adecuadas. Por lo tanto, ninguno de los sistemas analizados mostraba un desempeño óptimo, y algunas de las posibles razones serán analizadas en las secciones 3.2 y 3.3.

B. Análisis de capacidad y elementos constructivos

El CUADRO II muestra los resultados más importantes de la revisión de capacidad de las unidades de tratamiento anaeróbico. Los reactores anaeróbicos A, B C y D operaban a cargas muy inferiores a las recomendadas según la literatura [13]. En otras palabras, el caudal entrante era mucho menor a la capacidad del sistema. En ese sentido, los problemas de baja eficiencia mencionados en la Sección 3.1 no se deberían a un volumen insuficiente. El exceso de volumen representa una ineficiencia a nivel de costos constructivos y puede ocasionar problemas operacionales a nivel de comportamiento hidráulico del sistema (mezcla sustrato/microorganismos). Por otro lado, el sistema

E operaba por encima de su capacidad nominal, con caudales muy altos, esto muy posiblemente debido a la conexión ilícita mencionada anteriormente. Esto no se reflejaba en problemas de calidad del efluente debido a la baja concentración contaminante del agua (la COV recomendada no fue superada, pero sí los parámetros hidráulicos).

CUADRO II.
REVISIÓN DE CAPACIDAD DE LA UNIDAD DE TRATAMIENTO ANAERÓBICO.

Criterio revisado		Recomendado
A – UASB + LA	TRH = 32,5 h; COV = 0,44 kgDQO/m ³ -d; v _{ascen} = 0,13 m/h	TRH ≥ 7,0 h
B – UASB + FP	TRH = 26,6 h; COV = 0,677 kgDQO/m ³ -d; v _{ascen} = 0,37 m/h	COV ≤ 3,5 kgDQO/m ³ -d V _{ascen} de 0,5-0,7 m/h
C – UASB	TRH = 20,4 h; COV = 0,70 kgDQO/m ³ -d; v _{ascen} = 0,06 m/h	
D – FAFA	TRH = 66,2 h; COV = 0,05 kgDQO/m ³ -d; TAH = 0,91 m ³ /m ² -h; H piedra = 1,75m	TRH de 12-24h COV de 0,15-0,50 kgDQO/m ³ -d
E - FAFA	TRH = 8,4 h; COV = 0,43 kgDQO/m ³ -d; TAH = 12,0 m ³ /m ² -h; H piedra = 1,75m	TAH de 6-10 m ³ /m ² -h H piedra de 0,80-3,0m

TRH: tiempo de retención hidráulica; COV: carga orgánica volumétrica; v_{asc}: velocidad ascensional; TAH: tasa de aplicación hidráulica; H piedra: altura de estrato de piedra.

Con respecto a detalles constructivos de los sistemas, en varios de casos analizados había evidencia de corrosión de concreto y acero, producto de las reacciones con H₂S, según se observa en la Fig. 2.



Fig. 2. Evidencia de corrosión de elementos de concreto y acero en PTAR: (a) antorcha de acero al carbono; (b) vertedores de acero; (c) interior de tanque de concreto corroído.

Además, fue posible observar algunas deficiencias en los reactores UASB (PTAR A, B y C): uso de concreto en los separadores trifásicos (material que se ve muy afectado por el H₂S), paso de conexión entre los compartimientos de digestión y decantación muy inferior al requerido, ausencia de un sistema o mecanismo para la remoción de nata en el interior del separador trifásico, purga de lodo de una única profundidad (se recomiendan dos), errores en el sistema de distribución de caudal, errores constructivos en las canaletas de colecta del efluente, sistemas de captación y quema

de biogás en mal estado, entre otros. Para los FAFA (PTAR D y E) se observaron problemas en los canales de colecta del efluente, ausencia de un sistema de control de gas y ausencia de un sistema de monitoreo de la altura y concentración de lodo.

C. Operación y mantenimiento

Durante las visitas fue posible verificar que todas las PTAR contaban con caseta de operación y bodega para los materiales de la operación, respetando lo establecido en la reglamentación vigente [8]. Además, las evaluaciones de cada sistema permitieron detectar que la operación de las PTAR lleva un registro operacional que respetaba lo establecido en la reglamentación vigente [6]. Dicha reglamentación se enfoca exclusivamente en la calidad del efluente final vertido al cuerpo receptor, sin controlar varios de los parámetros recomendados en la literatura [15], que no se medían en las PTARs: nivel del manto de lodo, concentración y masa de sólidos en el reactor, actividad metanogénica específica de la biomasa, generación y características del biogás, control de la masa de purga, entre otros. Por otro lado, fue posible verificar que el nivel de conocimiento de los responsables de la operación de las PTAR era desigual entre los distintos administradores de los sistemas. En ese sentido, son necesarios mayores esfuerzos para establecer una línea base de conocimientos técnicos de los responsables de los sistemas, para que las personas operadoras puedan recolectar información adecuada que les permita tomar las mejores decisiones.

D. Recuperación y aprovechamiento de subproductos valorizables

Durante las visitas pudo observarse que ninguna de las PTAR hace un aprovechamiento del agua tratada (aun cuando en algunos casos el efluente se presta perfectamente para su aprovechamiento dentro de la PTAR tras una desinfección). Con respecto al biogás, ninguna PTAR tenía un sistema en funcionamiento para su captación y quema, menos para su aprovechamiento energético. Por último, en relación con el lodo, en algunas PTAR se disponía como mejorador del suelo (biosólido tipo B), mientras que en el resto se desechaban para relleno sanitario. Sin embargo, fue posible verificar que este uso como mejorador del suelo no responde a un plan agronómico que aproveche los nutrientes o materia orgánica del biosólido sino solamente a una facilidad operativa. Un diseño agronómico para el aprovechamiento de los biosólidos no se solicita en la reglamentación vigente [7], aunque sí se recomienda para prevenir problemas de contaminación del suelo [16].

CONCLUSIONES

El artículo mostró que las PTAR anaeróbicas evaluadas operan en condiciones desiguales a nivel de calidad del efluente. Sin embargo, en todas ellas fue posible identificar una serie de deficiencias a nivel de diseño, construcción y operación de los sistemas, que hacen que el rendimiento de los reactores anaeróbicos esté por debajo del desempeño establecido en la literatura técnica. Considerando que la tecnología anaeróbica para el tratamiento de las aguas residuales ordinarias presenta un gran potencial para Costa Rica, se recomienda mejorar la capacidad técnica de personas

administradoras, diseñadoras y operadoras en el país, en aspectos clave como actualización en los parámetros de diseño, detalles constructivos, parámetros de seguimiento de los sistemas, economía circular de los subproductos. Adicionalmente, existe para la academia un amplio potencial para desarrollar investigación, en temas como estudio de postratamientos sostenibles para los efluentes de los reactores anaeróbicos y aprovechamiento de los subproductos (biogás, lodo y agua). El conocimiento que se genere a partir de futuros estudios también debería ser transferido a la comunidad técnica nacional.

REFERENCIAS

- [1] AYA, MINAE, and MINSA, *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales*. San José, 2016.
- [2] D. Mora and C. F. Portuguez, “Agua para uso y consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2019: brecha al 2024,” San José, 2020.
- [3] 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, no. 2, pp. 97–110, 2019, doi: 10.15359/rca.53-2.5.
- [4] A. Noyola, A. Padilla-Rivera, J. M. Morgan-Sagastume, L. P. Güereca, and F. Hernández-Padilla, “Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America,” *Clean (Weinh)*, vol. 40, no. 9, pp. 926–932, 2012, doi: 10.1002/clen.201100707.
- [5] C. A. L. Chernicharo, J. B. van Lier, A. Noyola, and T. Bressani Ribeiro, “Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges,” *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 14, no. 4, pp. 649–679, 2015, doi: 10.1007/s11157-015-9377-3.
- [6] DE-33601-S-Minae, “Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales,” San José, p. 56, 2007.
- [7] DE-39316-S, “Reglamento para el manejo y disposición final de lodos y biosólidos,” p. 21, 2015.
- [8] DE-39887-S-Minae, “Reglamento de Aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales,” San José, Costa Rica, p. 27, 2016.
- [9] T. Bressani-Ribeiro, C. A. L. Chernicharo, L. C. S. Lobato, and P. N. P. Neves, “Design of UASB reactors for sewage treatment,” in *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*, 1 ed. IWA Publishing, 2019, pp. 61–116.
- [10] C. A. L. Chernicharo, *Anaerobic Reactors*, vol. 6, no. 0. Belo Horizonte, Brasil: IWA Publishing, 2007. doi: 10.2166/9781780402116.
- [11] A. Soares et al., “Closing cycles in anaerobic-based sewage treatment systems,” in *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, Construction and Operation*, C. A. L. Chernicharo and T. Bressani-Ribeiro, Eds., IWA Publishing, 2019, p. 0. doi: 10.2166/9781780409238_0367.
- [12] WEF, *Design of Water Resource Recovery Facilities*, Sixth. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, 2018.
- [13] M. von Sperling, *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, Fourth. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.
- [14] Metcalf & Eddy, *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*, Fifth Ed. New York: McGrawHill, 2014.

- [15] C. A. L. Chernicharo, T. Bressani-Ribeiro, and L. C. S. Lobato, “Operation of UASB reactors for sewage treatment,” in *Anaerobic Reactors for Sewage Treatment: Design, construction and operation*, 1era ed. IWA Publishing, 2019, pp. 131–163.
- [16] C. Andreoli, M. Von Sperling, and F. Fernandes, *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*, 2da ed. Belo Horizonte, 2014.

Crecimiento urbano, precipitación y escorrentía ante el cambio climático: una exploración a través de modelos de automata celular en la Gran Área Metropolitana, Costa Rica

Urban Growth, Precipitation, and Runoff in the Face of Climate Change: An Exploration of the San José Metropolitan Region, Costa Rica, through Cellular Automata Models

Eduardo Pérez-Molina

*Profesor adjunto, Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible
y Escuela de Ingeniería Civil, UCR
e-mail: eduardo.perezmolina@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Crecimiento urbano, precipitación, cambio climático, escorrentía, automata celular.

Keywords:

Urban growth, precipitation, climate change, runoff, cellular automata.

RESUMEN

Este trabajo es un primer esfuerzo por evaluar impactos futuros de crecimiento urbano y tendencias de precipitación sobre volúmenes de escorrentía en la GAM. Se calibró un modelo de crecimiento urbano basado en automata celulares simulando la cobertura urbana anual para 1997-2021 y comparándola con mapas de cobertura del suelo de 1997, 2005, 2012 y 2021. Posteriormente, se simuló anualmente el crecimiento urbano y la escorrentía derivada de la cobertura del suelo resultando para el periodo 2021-2045; la escorrentía fue calculada mediante el método del SCS de EEUU. La precipitación diaria máxima anual fue seleccionada del experimento EC78 Earth3, escenario SSP5-8.5 de la serie CMIP 6. Aplicando este método, se logró reproducir el efecto agregado del crecimiento urbano (reflejado en índices morfológicos regionales), aunque para ciertas zonas de la región el mapa de cobertura urbana simulado era más compacto que los mapas de cobertura del suelo. Se encontró también que la variabilidad climática natural es el principal determinante de la escorrentía, más que tendencias de precipitación o crecimiento urbano. Sin embargo, la acumulación de cobertura urbana causó un aumento de escorrentía de entre 11% y 13% a partir de 2037, relativo a lo que ocurriría en ausencia de expansión urbana.

ABSTRACT

This paper is an initial effort to evaluate the impact of future urban growth and precipitation trends on runoff volumes in the GAM. A cellular automata model of urban growth was calibrated by simulating yearly the urban footprint for 1997-2021 and comparing it to land cover maps of 1997, 2005, 2012, and 2021. Based on this model, the urban footprint was simulated yearly for 2021-2045; furthermore, these simulations were used as inputs to estimate runoff for each year using the SCS of the US. Daily maximum precipitation

was selected from experiment EC78 Earth3 and SSP-8.5 from the CMIP 6 series. Based on this method, the aggregate effect of urban growth (evaluated through morphological indices) was accurately reproduced, though certain zones of the predicted urban pattern were more compact than land cover maps. While natural climate variability resulted as the main determinant of runoff, more so than urban growth or precipitation trends (associated to climate change), an increase of 11% to 13% (relative to a scenario with no urban growth after 2021) was detected from 2037 onwards due to the accumulation of impervious urban area.

I. INTRODUCCIÓN

La escorrentía, producto de un evento de precipitación extremo, es el flujo de agua que corre sobre la superficie del terreno. La secuencia en que ocurre el proceso de generación de escorrentía incluye la caída de precipitación, volumen que se divide entre la fracción infiltrada en el suelo, la evaporación de agua acumulada en el suelo o vegetación, la transpiración desde la vegetación misma y la fracción restante, que corresponde a la escorrentía [1]. Los procesos físicos que producen escorrentía responden a cambios de corto plazo, dadas las características (en particular, la intensidad) del evento extremo de precipitación que causa la escorrentía, y a cambios de largo plazo, en la cobertura del suelo y en tendencias climáticas [2], [3]. En general, resultados anteriores sugieren que la escorrentía es más sensible ante cambios en precipitación que en la cobertura del suelo [3]. Sin embargo, la acumulación de impactos de la expansión de actividades humanas, específicamente del crecimiento urbano, es en muchos casos más rápida que los cambios en las tendencias de eventos de precipitación. De ahí que sea importante analizar la interacción entre las distintas variables críticas que determinan la escorrentía con miras a plantear intervenciones de inversión y ordenamiento territorial que se anticipen a mitigar sus impactos de largo plazo.

Como respuesta ante esta necesidad, se presenta un marco metodológico de modelación prospectiva espacialmente explícita que permite ligar la evolución de los patrones de uso del suelo con consecuencias físicas. En este esquema, un modelo de crecimiento urbano basado en automata celular (ver [4]) permite reproducir los patrones esenciales del área desarrollada en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Con base en los resultados de este, se utiliza un segundo modelo [1] para estimar la escorrentía (que a su vez requiere estimaciones de precipitación, tomadas de modelos globales de proyecciones de lluvia para considerar los efectos esperados del cambio climático; ver [5]). Esta combinación de insumos busca determinar cuáles son las variables (crecimiento urbano, precipitación) con mayor incidencia sobre el impacto (escorrentía) y en qué lugares se generan estos impactos.

II. METODOLOGÍA

A. Modelo celular para reproducir el crecimiento urbano

El modelo de automata celular describe el crecimiento urbano en la GAM dividiendo el área de estudio en celdas cuadradas de 30m de lado. Cada celda se considera un automata A caracterizado por un estado (G), un grupo de reglas de transición (T) que determinan los cambios de estado y un vecindario de automata (R), definido como las celdas cercanas a A y que influyen sobre su estado:

$$A \sim (\mathbf{G}, \mathbf{T}, \mathbf{R}) \quad (1)$$

El modelo planteado corresponde a un automata celular donde el estado A es urbano ($\mathbf{G} = 1$) o no urbano ($\mathbf{G} = 0$). Se ha adoptado un vecindario de Moore extendido (un cuadrado de n celdas de lado, centrado en cada automata que se analiza) para definir \mathbf{R} y como determinante de su estado. La regla de transición se define de la siguiente manera:

$$A_i = \begin{cases} 1 & \forall \sum A_l \geq c \\ 0 & \forall \sum A_l < c \end{cases} \quad (2)$$

donde A_l son las celdas que pertenecen a \mathbf{R} , el vecindario de A_i . Esta regla se aplica en cada periodo simulado. La cantidad c es un valor seleccionado de modo tal que resulte satisfecha la demanda total por área desarrollada. Si la demanda por suelo urbano entre t_0 y t_n es igual a N , entonces se selecciona c de modo que se cumpla $N \approx \sum_{t_n} A_i - \sum_{t_0} A_i$, la diferencia entre todas las celdas urbanas en t_0 y t_n .

B. Estimación de escorrentía

La estimación de escorrentía fue realizada mediante la aplicación del método de número de curva, del *Soil Conservation Service* de EEUU [1]. De acuerdo con este método, la escorrentía viene dada por:

$$Q_e = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (3)$$

donde Q_e es el volumen de escorrentía, P es la precipitación total, y S es la razón entre Q_e y P . En esta formulación, se supone una abstracción inicial de $0,20 \cdot S$, absorbida por la cuenca, antes de que inicie la escorrentía. El valor de S es estimado a partir del número de curva (CN), un parámetro que depende de las características del suelo, la vegetación y el uso del suelo.

La escorrentía fue estimada con el modelo InVEST [6], a partir de los mapas de cobertura del suelo simulados con el modelo de automata celular, con los datos de precipitación máxima correspondientes a cada año y suponiendo que otros parámetros (relativos a las características de infiltración y humedad antecedente del suelo, con sus consecuencias sobre la vegetación) permanecen constantes.

C. Estrategia e implementación de modelación

La implementación de los modelos descritos consistió en: una primera parte de calibración y validación del modelo de crecimiento urbano y una segunda parte de (a) simulación de proyecciones de crecimiento urbano, basadas en escenarios que varían el ritmo de crecimiento, y (b) determinación de la escorrentía generada por los distintos patrones de área desarrollada simulados.

La primera etapa de calibración buscar juzgar las capacidades del modelo de automata celular en reproducir patrones (conocidos) de crecimiento urbano:

- El modelo de crecimiento urbano fue simulado con un paso anual entre 1997 y 2021 (es decir, 24 periodos); para cada uno, se aplicó la ecuación 2 a cada periodo simulado.
- La demanda total por suelo urbano durante este periodo (1007-2021) fue igual a 14437ha (160413 celdas). La demanda para cada periodo fue distribuida uniformemente entre todos los periodos simulados. Para cada periodo, c fue seleccionado para satisfacer la demanda con el mínimo valor posible (el vecindario de Moore extendido fue definido como de $n = 5$ celdas, 150m).
- Se multiplicó cada T por un valor aleatorio dentro del rango $[0, 80, 1, 00]$ para introducir algún grado de aleatoriedad en los patrones de crecimiento urbano y para mejorar la eficiencia del algoritmo.
- Se validó el modelo de crecimiento urbano estimando, para mapas de cobertura del suelo (derivados de interpretación de imágenes satelitales) y para los mapas de área desarrollada simulados, los índices contiguidad (la razón entre el área del parche de área desarrollada de mayor tamaño y la suma de área desarrollada en parches contiguos de 25 ha o más) y de compacidad (la razón entre el área del parche de área desarrollada de mayor tamaño y el área del círculo más pequeño que circunscribe a ese parche) propuestos por [7].

El modelo de automata celular desarrollado fue luego utilizado para simular el crecimiento urbano del periodo 2021-2045. Estos patrones fueron entonces utilizados para estimar la escorrentía de cada uno de esos periodos.

- El objetivo de la simulación prospectiva consiste en aislar el impacto posible del cambio climático sobre la precipitación de los efectos del cambio en la cobertura del suelo.
- Se estimó un escenario de crecimiento urbano prospectivo en el cual la demanda anual por suelo urbano se mantuvo constante (1440ha por año). Este fue contrastado con un segundo escenario para el cual se supuso que no existiría crecimiento urbano (i.e., el área desarrollada permanece constante y coincide con el panel superior izquierdo de la figura 1).
- Para los dos escenarios, se estimó la escorrentía utilizando el método descrito, lo cual implica la necesidad de (a) un evento de precipitación diario, (b) coberturas del suelo para el área no desarrollada y (c) grupo de suelo hidrológico.
- La escorrentía fue estimada para el máximo diario de precipitación anual, tomado del experimento *EC-Earth3* y escenario *SSP5-8.5* de la serie CMIP 6 (de acuerdo con los resultados de [5], retomados por [8]). Los datos de precipitación diaria están disponibles en la plataforma Google Earth Engine [9], en la cual también fueron procesados.
- Al área no desarrollada se le asignó la cobertura del suelo reportada por [10] para el año 2020. Esto implica que se supuso que los usos y coberturas del suelo no urbanos se mantuvieron constantes a lo largo del periodo simulado.

- La estimación del número de curva requirió de datos sobre grupo hidrológico del suelo. Estos fueron asignados con base en el mapa de capacidad de uso del suelo del Ministerio de Agricultura y Ganadería, desarrollado para Costa Rica a escala 1:200 mil en 1991 [11].

II. SIMULACIONES DE CRECIMIENTO URBANO

Los resultados de las simulaciones se muestran en la figura 1: los páneces de la izquierda corresponden a mapas de crecimiento urbano derivados de interpretación de imágenes satelitales (de 1997, 2012 y 2021) y los de la derecha, a los resultados del modelo para dos años (2012 y 2021). Resulta claro que los patrones simulados son mucho más compactos que el área que fue efectivamente desarrollada durante este periodo. Cuando se examinan las simulaciones, muchos de los vacíos en la trama urbana de 1997 –particularmente en el área metropolitana de San José– son ocupados antes de que se desarrollen las periferias de Alajuela y Heredia. Asimismo, los patrones simulados parecen mostrar mayor desarrollo (además de más compacto) del que acabó ocurriendo en el área metropolitana de Cartago. Esto evidentemente no ocurrió; en cambio, este desarrollo fue disperso en el oeste de la región, en parte por influencia de la ruta nacional 27 y en parte por el atractivo, en términos de cercanía a importantes zonas francas y a San José mismo, de la ciudad de Heredia.

De examinar la figura 1, parece que el modelo presenta limitaciones en cuanto a reflejar apropiadamente de terminados diferenciales espaciales de la GAM: (1) que el oeste (Escazú-Santa Ana y las periferias de Alajuela y Heredia) de la región es más atractivo, por su mayor accesibilidad, que el este (Cartago) y (2) que existen vacíos en las tramas urbanas, particular pero no exclusivamente de San José, que no han sido desarrollados posiblemente porque no sean aptos para usos urbanos. Estas limitaciones no son sorprendentes: el modelo de automata celular se basa exclusivamente en la proximidad ante otros usos urbanos, como forma de identificar las mejores localizaciones para desarrollo urbano. La aleatoriedad introducida no es suficiente para generar gran dispersión y ciertamente no es capaz de reproducir factores espacialmente sistemáticos –proximidad a la ruta nacional 27, proximidad a los centros de atracción del sur de Heredia y Alajuela, menor accesibilidad de Cartago relativo a otras zonas de la GAM. Es posible introducir estos factores como mapas adicionales que modifiquen la regla de transición **T**.

Este tipo de extensión del modelo de crecimiento urbano implicaría que el término A de la ecuación 2 debería ser normalizado y promediado con otros factores, e.g. distancia Euclídeana a la ruta nacional 27 o densidad de calles. A su vez, este promedio debería ser ponderado y los factores de ponderación se convertirían en parámetros adicionales del modelo (ver [4]). Un segundo elemento usualmente introducido consiste en excluir zonas no aptas para el crecimiento urbano, por razones regulatorias o físicas, del análisis (e.g., ver [12]). Aunque muchos modelos de crecimiento urbano modernos ya incorporan este carácter híbrido, para relajar el supuesto de isotropía en el espacio implícito, los factores de ponderación han sido tradicionalmente definidos con base en teoría o criterio de experto. El desarrollo de técnicas de calibración para este tipo de modelos a partir de datos históricos ha sido más limitado, aunque el uso de técnicas de asimilación de datos en conjunto con estadística bayesiana es un campo prometedor (e.g., ver [13]).

Pese a las limitaciones señaladas, el modelo de automata celular utilizado sí es capaz de reproducir las características agregadas de la forma urbana regional (según puede verse en el CUADRO I. Específicamente, los índices de compacidad y contiguidad de los mapas de cobertura del suelo sugieren una conurbación de San José, primero con Heredia y luego con Alajuela. Esto significa que el parche de mayor tamaño de área desarrollada (el ‘corazón’ 122 de la región) se convierte en una extensión más o menos contigua de desarrollo urbano que une los centros de San José, Heredia y Alajuela: por ello, el índice de contiguidad aumenta de 52 en 2005 a 72 en 2012 y el de compacidad se reduce, de 34 a 25 (pues al ser un parche más extenso, el radio del círculo que lo circunscribe se incrementa). Es interesante que el modelo de crecimiento urbano sí logra reproducir esta tendencia pero más lentamente (en lugar de 2005-2012, esta diferencia es simulada entre 2012 y 2021). Capturar esta dinámica es importante porque la calibración mediante asimilación de datos bayesiana requiere de medidas agregadas del paisaje (urbano) para guiar la selección de parámetros: por una parte, las medidas propuestas por [7] deben ser incluidas entre estas medidas agregadas, dado que representan una característica esencial de la evolución de la mancha urbana regional; por otra, resulta claro que no bastan porque pueden reproducirse incluso sin reflejar la dispersión ni la mayor atracción relativa del oeste regional (ya discutidas), que también son características esenciales del crecimiento urbano en la GAM.

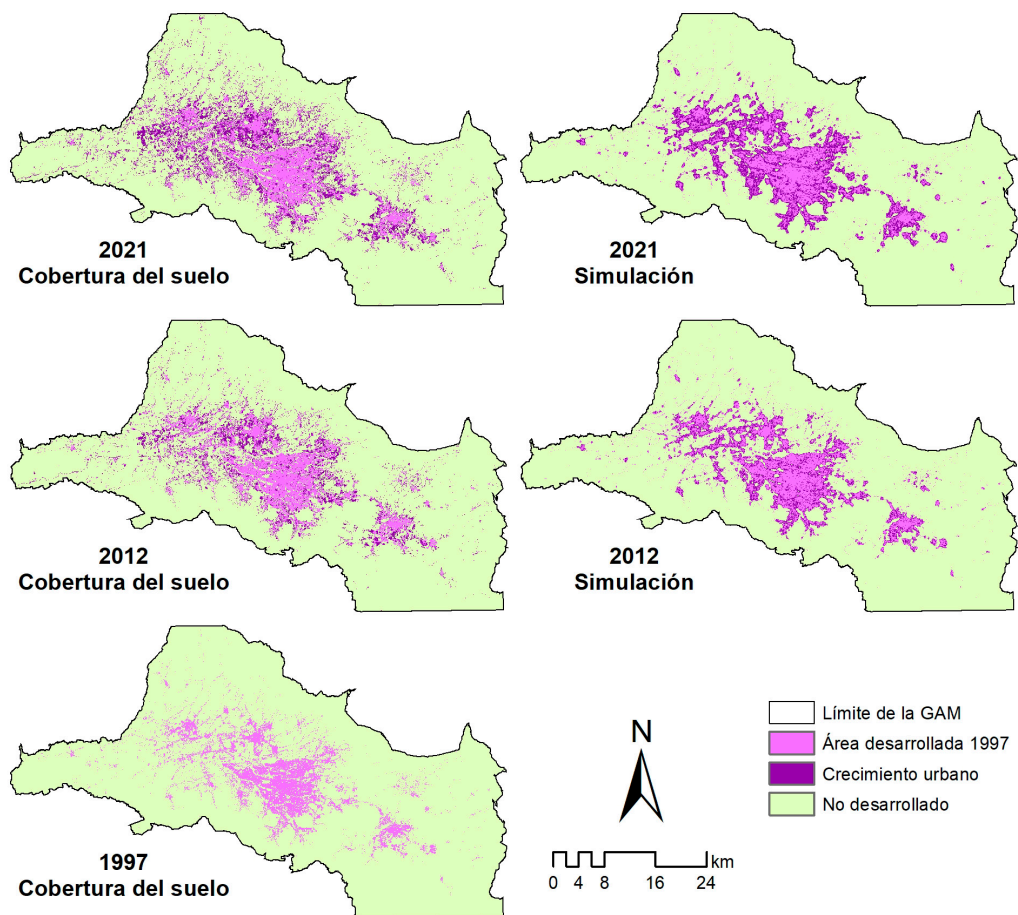


Fig. 1. Mapas de crecimiento urbano de la GAM, 1997, 2012 y 2021.

CUADRO I.
ÍNDICES MORFOLÓGICOS DE ÁREA
DESARROLLADA PARA LA GAM.

Índice de compacidad				
	1997	2005	2012	2021
Simulación	–	31	36	27
Cobertura del suelo	26	34	25	22
Índice de contigüidad				
Simulación	–	56	52	75
Cobertura del suelo	57	52	72	78

III. TENDENCIAS DE ESCORRENTÍA, CRECIMIENTO URBANO Y PRECIPITACIÓN

La simulación de escorrentía parte de los patrones de cambio de uso del suelo se ejemplifican en la figura 2. Se muestra en ella el periodo inicial, 2012, y las simulaciones para 2033 y 2045. El patrón de cobertura del suelo muestra bosques en las montañas con mayores pendientes al sur de la GAM, cultivos (café al norte de Heredia y Alajuela y hortalizas al noreste, cerca de Cartago) al norte y pastos en los extremos este y oeste de la región. Como es de esperar, dada la discusión sobre el modelo de crecimiento urbano, las simulaciones resultan en un área urbana compacta, que va ocupando los espacios vacíos de los principales parches de área desarrollada. Estos corresponden sobre todo a pastos –la categoría pastos parece ser la cobertura del suelo que se reporta para zonas con menor actividad humana– en tanto que los lugares de cultivos y zonas de árboles (que son más periféricos) muestran pocos cambios. Sí es importante señalar que muchos cultivos, particularmente en las zonas cafetaleras, pueden ser cobertura del suelo (hay café) pero no necesariamente son uso del suelo, en el sentido de que no son cafetales productivos sino que han sido abandonados, y los propietarios están especulando con el suelo.

Los resultados de la cuantificación de escorrentía se muestran en la figura 3, al igual que las tendencias de precipitación simuladas (que, recuérdese, son el resultado de un modelo de circulación global para incorporar los efectos del cambio climático) y el área desarrollada total de la región. El panel inferior derecho, que corresponde al área desarrollada total por año, es la materialización del supuesto de modelación (i.e. que la expansión urbana será constante durante los próximos 24 años), por lo cual muestra un crecimiento lineal. El modelo de automata celular fue exitoso en asignar la demanda de suelo urbano supuesta. Nótese de la figura que, aunque claramente creciente, el porcentaje de área desarrollada nueva es relativamente pequeño con respecto al conjunto de la región (sin embargo, pese a ello, el área simulada en 2045 fue un 44 % mayor que el área del año base, 2021). En cuanto a la precipitación (figura 3, panel inferior izquierdo), no exhibe ninguna tendencia especialmente definida (aunque debe señalarse que son solo los primeros años de los pronósticos y, además, que el tamaño de muestra es pequeño, tan solo 24 años). Como es de esperar, y ha sido argumentado, la

variabilidad natural de la precipitación excede el cambio en la tendencia de largo plazo, por lo menos durante estas primeras décadas en que se esperan efectos del cambio climático [14].

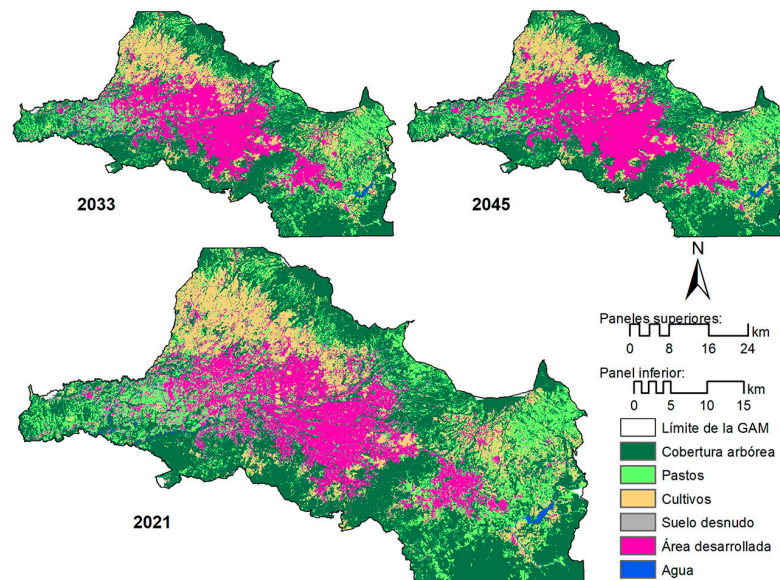


Fig. 2. Cobertura del suelo simulada para estimación de escorrentía, 2021, 2033 y 2045.

La tendencia de escorrentía que se muestra en la figura 3, panel superior, reproduce las expectativas: durante los primeros años de la serie, cuando las diferencias entre la línea base (que supone que no hay crecimiento urbano) y los patrones simulados son pequeños (porque el crecimiento urbano fue poco), la escorrentía es casi igual en ambos escenarios. Conforme se desarrolla la simulación y se acumula más crecimiento urbano, la línea negra (de la simulación) pasa a ser sistemáticamente mayor que la línea gris (línea base). La separación comienza a notarse en torno a 2030 y se vuelve más evidente a partir de 2040. Sin embargo, y como también era de esperar, ambas líneas de escorrentía total responden en mucha mayor medida a la precipitación que al cambio en el uso del suelo: nótese que las tendencias de escorrentía y precipitación siguen esencialmente la misma forma (con tres picos en los años en que se pronosticaron eventos especialmente grandes). Lo que es especialmente notorio en la figura es la proporción de variación: la diferencia entre ambas líneas llega a ser, como máximo (en 2045) un 21 % de la escorrentía total de la línea base y oscila entre 11 % y 13 % entre 2037 y 2044, los últimos años de la serie.

En suma, como se resume más explícitamente en la figura 4, el aumento de escorrentía producto del crecimiento urbano (i.e., la diferencia entre los patrones de cobertura del suelo simulados y la línea base) aumenta con el crecimiento urbano que se acumula en el tiempo. Pero también es notable (y más evidente de la figura 4) que aumentan para los periodos en que ocurren eventos de precipitación de mayor magnitud. Esto puede ser consecuencia de la menor importancia de la abstracción inicial que supone el método del SCS (y que refleja una realidad física) en eventos de mayor precipitación. Dado que el largo plazo ocurre antes en sistemas sociales que en sistemas físicos, en esta primera simulación se ha optado por un periodo de tan solo 24 años; pero es interesante comprobar que,

para periodos mayores, es posible que el efecto del crecimiento urbano pueda ser cada vez más importante si existe una tendencia a largo plazo de eventos extremos más grandes o frecuentes (la evidencia al respecto es aún incierta, aunque si se han detectado lugares en Costa Rica donde sería de esperar mayor escorrentía, 178 e.g., ver [8]).

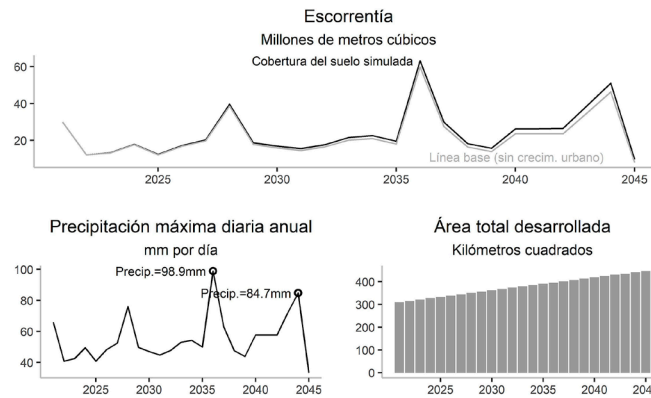


Fig. 3. Tendencias simuladas de escorrentía a partir de precipitación y simulaciones de crecimiento urbano.

Por último, es necesario señalar la importancia y la oportunidad que representa la modelación espacialmente explícita del crecimiento urbano y los patrones de escorrentía. Las estimaciones presentadas en las figuras 3 y 4 son agregadas para toda la región. Sin embargo, y precisamente porque el crecimiento urbano se concentra en determinados lugares con características geográficas que se pueden determinar, el impacto de la escorrentía va a ser mayor en algunas zonas de la región que en otras. Así, el marco metodológico que se presenta puede tener aplicaciones específicas para introducir en diseños (e.g. de alcantarillados pluviales) los efectos esperados del cambio climático y el crecimiento urbano (aguas arriba) en sistemas concretos. Para ello, es necesario reducir notablemente las incertidumbres de los modelos: (a) sobre los datos de precipitación, es necesario aumentar el detalle de su escala geográfica mediante la aplicación de métodos de downscaling [5] y realizar correcciones de sesgos con mediciones de precipitación locales, (b) en cuanto a los patrones de crecimiento urbano, es importante incorporar más factores (en particular, de accesibilidad y de aleatoriedad) para mejor reflejar los patrones de crecimiento urbano y (c) para el área no desarrollada, deben estudiarse con mayor profundidad las transiciones de usos de suelos agropecuarios y naturales, entre sí y con el crecimiento urbano, para incorporarlas en la simulación.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados muestran cómo el crecimiento urbano en la región ha sido relativamente rápido (y podría continuar con esta tendencia). También muestran que la variabilidad natural de la precipitación es considerable, mayor que las tendencias de cambio en los eventos extremos de precipitación durante los años simulados. El crecimiento urbano implica mayor escorrentía como consecuencia, en toda la región y aún más en lugares específicos de ella. Sin

embargo, cuando se combinan los efectos del crecimiento urbano con eventos extremos de precipitación especialmente grandes, los efectos sobre la escorrentía de ambos resultaron ser mayores. Por tanto, es necesario estudiar –mediante simulaciones– los impactos sobre la escorrentía de los distintos componentes conjuntamente.

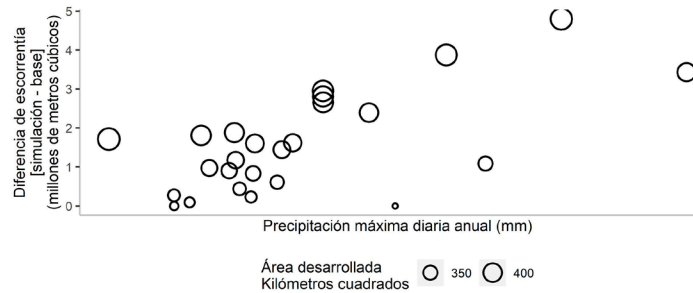


Fig. 4. Diferencia de escorrentía entre escenario base y escenario simulado vs. precipitación máxima diaria anual y área total desarrollada.

La GAM está sufriendo un proceso de conurbación, especialmente al oeste (entre San José, Heredia y Alajuela) y el modelo de crecimiento urbano generado, que se basa en automata celular y aglomeración de desarrollo urbano, es capaz de reproducir agregadamente este efecto. Sin embargo, los patrones simulados son menos dispersos que los mapas de cobertura del suelo derivados de interpretación de imágenes satelitales. Por tanto, es importante introducir nuevos factores en la determinación de los lugares en que se simula crecimiento urbano (en particular, reflejando la mayor accesibilidad del oeste de la región, incluido el efecto de la ruta nacional 27, y la mayor aleatoriedad del crecimiento urbano) y aplicar técnicas de calibración más sofisticadas para determinar el papel de cada uno en el proceso de crecimiento urbano.

Así, este trabajo ha permitido llegar a conclusiones iniciales sobre los impactos del crecimiento urbano sobre procesos físicos (en particular, de generación de escorrentía). Pero también permitió articular los siguientes pasos en el desarrollo de investigación en el tema: en un primer momento, la mejora de los modelos de precipitación, ajustándolos mediante downscaling y corrección de sesgos a las condiciones de la GAM, el estudio de los usos y coberturas del suelo agropecuarias y naturales (que aún no han sido incorporados en el marco de modelación) y las mejoras señaladas a las reglas de transición del modelo de automata celular. Posteriormente, es importante introducir otros criterios ambientales (especialmente la disponibilidad de agua potable) y estudiar las relaciones de retroalimentación que puedan existir entre patrones urbanos y los procesos físicos relevantes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto C2182 con financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Se agradece la asistencia en el procesamiento de datos de Karen Jiménez.

REFERENCIAS

- [1] V. P. Singh y S. K. Jain, < Rainfall-Runoff Modeling, > en *Handbook of Applied Hydrology*, V. P. Singh, ed., Second, Nueva York, EEUU: McGraw-Hill, 2017, cap. 59, págs. 59-1-59-8.
- [2] A. Bronstert, D. Niehoff y G. Bürger, < Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities, > *Hydrological Processes*, vol. 16, n.o 2, págs. 509-529, 2002. DOI: 10.1002/hyp.326.
- [3] M. Nearing, V. Jetten, C. Baffaut et al., < Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover, > *Catena*, vol. 61, n.o 2-3, págs. 131-154, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.03.007.
- [4] J. Van Schrojenstein Lantman, P. H. Verburg, A. Bregt y S. Geertman, < Core Principles and Concepts in Land-Use Modelling: A Literature Review, > en *Land-Use Modelling in Planning Practice*, ép. The Geo Journal Library, E. Koomen y J. Borsboom-van Beurden, eds., vol. 101, Dordrecht, Países Bajos: Springer Netherlands, 2011, cap. 3, págs. 35-57.
- [5] M. Almazroui, M. N. Islam, F. Saeed et al., < Projected Changes in Temperature and Precipitation Over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs, > *Earth Systems and Environment*, vol. 5, págs. 1-24, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00199-5.
- [6] H. Angarita, K. Arkema, N. Bhagabati et al., *INVEST User's Guide*. Stanford, CA: The Natural Capital Project, 2014.
- [7] S. Angel, S. Sheppard, D. L. Civco et al., *The Dynamics of Global Urban Expansion*. Washington, DC: World Bank, Transport and Urban Development Department, 2005.
- [8] H. G. Hidalgo León, E. J. Alfaro Martínez y A. Quesada Román, < Future Changes in Simulated Streamflow in Costa Rica from CMIP6 climate models, > en *Frontiers in Hydrology Meeting*, I. Stewart, E. Maurer y E. J. Alfaro, eds., American Geophysical Union, Online Session, 2022.
- [9] N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau y R. Moore, < Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, > *Remote Sensing of Environment*, 2017. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- [10] CATIE, MINAE y GIZ. < Atlas de Servicios Ecosistémicos de la Gran Área Metropolitana. > (2021), dirección: <https://sites.google.com/view/atlas-v1-1/inicio> (visitado 18-05-2023).
- [11] Acón y Asociados, < Manual Descriptivo de la leyenda del Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra de Costa Rica Escala 1:200.000, > Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, inf. téc., 1991.
- [12] J. C. Vargas-Moreno y M. Flaxman, < Using Participatory Scenario Simulation to Plan for Conservation Under Climate Change in the Greater Everglades Landscape, > en *Restoring Lands-Coordinating Science, Politics and Action: Complexities of Climate and Governance*, H. A. Karl, L. Scarlett, J. C. Vargas-Moreno y M. Flaxman, eds., Dordrecht, Países Bajos: Springer, 2012, cap. 3, págs. 27-56.
- [13] J. A. Versteegen, D. Karssenbergh, F. van der Hilst y A. P. C. Faaij, < Detecting systemic change in a land use system by Bayesian data assimilation, > *Environmental Modelling & Software*, vol. 75, págs. 424-438, 2016.
- [14] H. G. Hidalgo, < Climate variability and change in Central America: What does it mean for water managers? > *Frontiers in Water*, vol. 2, pág. 632 739, 2021.

Avances en la robótica

Implementación y prueba de algoritmos para navegación en una plataforma robótica de configuración diferencial

Implementation and testing of navigation algorithms for a differential configuration mobile robotic platform

Ing. Gabriel Angulo Sibaja

Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), UCR

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

Ing. Leonardo José Marín Paniagua, PhD.

Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), UCR

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

Palabras clave:

Evasión de obstáculos, mezcla de comportamientos, navegación autónoma, robot móvil diferencial, seguimiento de trayectorias.

Keywords:

Autonomous navigation, differential mobile robot, mix of behaviors, obstacle avoidance, trajectory tracking.

RESUMEN

En este trabajo se implementan algoritmos de navegación autónoma mediante herramientas especializadas en robótica conocidos como *Robot Operating System* (ROS). La implementación de los algoritmos seleccionados ha sido realizada en el lenguaje de alto nivel Python y se realizan pruebas de validación en un robot diferencial real de construcción propia en el CERLab. El principal aporte es la implementación una mezcla de comportamientos entre el algoritmo de Persecución Pura de seguimiento de trayectorias y el algoritmo Braitenberg de evasión de obstáculos, aplicadas a un robot diferencial simulado y real. De las simulaciones y pruebas de validación realizadas se observa un funcionamiento adecuado tanto para seguir la trayectoria como para la evasión de obstáculos, de acuerdo a las mediciones realizadas con un sistema de captura de movimiento, mostrando un seguimiento adecuado en trayectorias cuadradas y circulares, así como en la evasión de obstáculos establecidos en la arena de pruebas.

ABSTRACT

In this work, autonomous navigation algorithms are implemented using specialized robotics tools known as *Robot Operating System* (ROS). The selected algorithms have been implemented in the high-level language Python, and validation tests are carried out in a real differential robot built at the laboratory CERLab. The main contribution is the implementation of a mixture of behaviors between the Pure Pursuit trajectory tracking algorithm and the Braitenberg obstacle avoidance algorithm, applied in simulations and to a differential robot. From the simulations and validation tests conducted, reliable performance is observed both for

trajectory following and obstacle avoidance, according to the measurements executed with a motion capture system, showing satisfactory trajectory following in square and circular trajectories, as well as in the fixed obstacle avoidance in the test arena.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, desde la revolución industrial, se ha buscado automatizar la mayor cantidad de procesos posibles, esto para realizar trabajos más eficientes y eficaces para aumentar la producción, disminuir riesgos, aligerar costos, entre otros. El control completo y perfecto no existe y, por consecuente, se sigue innovando, analizando e implementando nuevas formas de control. Entre las grandes áreas de procesos de control cabe mencionar el área industrial, médica, transporte, aeroespacial, telecomunicaciones, robótica, entre otras. La presente investigación se centra en la automatización de procesos en el área de la robótica móvil. Esta área es un campo de estudio multidisciplinario que requiere conocimientos de las áreas de ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica e ingeniería de control. El que un robot o un proceso sea autónomo conlleva a que tome decisiones sin la necesidad de la intervención un ente externo al sistema, para realizar tareas o cumplir objetivos. De esta forma se busca implementar una plataforma robótica móvil en configuración diferencial para la validación de algoritmos de navegación y evasión de obstáculos utilizados en un plano horizontal, empleando entornos de simulación basados en ROS y un robot diferencial real.

II. METODOLOGÍA

Se realiza una investigación teórica de la descripción de la robótica móvil, la configuración diferencial y los algoritmos de navegación y evasión de obstáculos. Para ello, se utilizan fuentes bibliográficas orientadas a la robótica móvil para el estudio de los algoritmos de Persecución Pura y Braitenberg. Para el simulador, se investiga el funcionamiento de ROS y su interacción en el software de Gazebo. Por último de ámbito teórico, se estudia la forma de programación e implementación de un microcontrolador Raspberry Pi. Seguidamente, se realizan las pruebas iniciales en el software Gazebo. Se prosigue con la implementación de los algoritmos. Después de la implementación, se extraen los datos relevantes y gráficos de error en desplazamiento. Posteriormente, se empieza con las pruebas iniciales del robot real. Se implementa los algoritmos en la unidad robótica real y se extraen los datos relevantes del sistema de captura de movimiento, así como los gráficos de error en desplazamiento, con su respectivo análisis.

III. MARCO TEÓRICO

La robótica móvil abarca aquellas plataformas que tienen la posibilidad de desplazarse en distintos entornos para cumplir tareas. Dentro de la autonomía del robot se requiere del desplazamiento, tomando en cuenta obstáculos y trayectorias, a este desplazamiento se le conoce como navegación autónoma [2]. La configuración utilizada en el proyecto es el diferencial, Fig. 1a, que cuenta con dos ruedas convencionales y no posee ruedas direccionables [2].

IV. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Robot Operating System ROS es un sistema operativo de código abierto compuesto por distintas herramientas y bibliotecas de software orientado principalmente a la simulación de robots. Gazebo es un simulador 3D en la que se pueden utilizar modelos dinámicos de robots, e incluye la disponibilidad del uso de sensores. Para la plataforma real se utiliza un modelo diferencial del laboratorio, Fig. 1b y 1c.

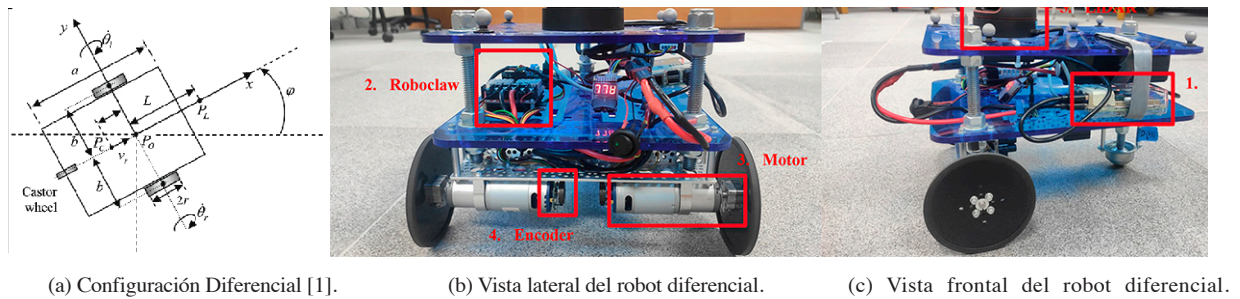


Fig. 1. Diagrama diferencial y robot real para validación.

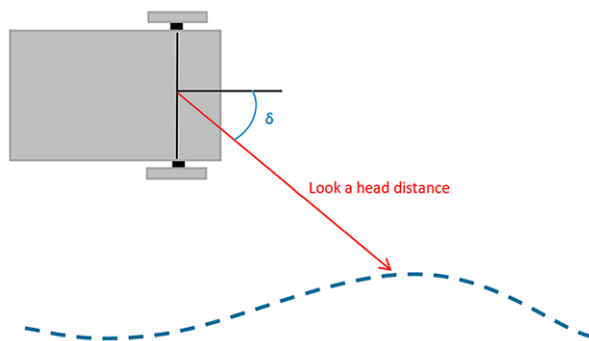


Fig. 2. Distancia Look a Head vista de un robot.

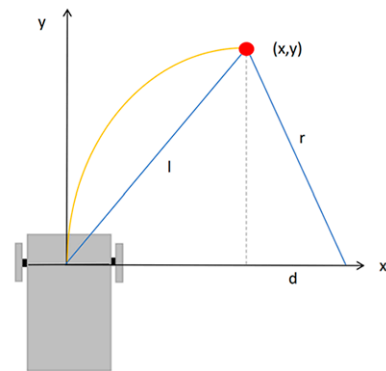


Fig. 3. Curva a generar en función de la distancia Look a Head.

V. ALGORITMOS UTILIZADOS

A. Algoritmo de seguimiento de trayectoria

Persecución Pura: Este algoritmo se encarga de calcular el ángulo y velocidad requerido para que el robot cumpla con una trayectoria deseada. Dicho cálculo se realiza a partir de una distancia l (lookahead), Fig. 2, que establece el punto al que el robot se va a direccionar generando una curva, Fig. 3. El algoritmo l muestra el pseudocódigo del algoritmo de Persecución Pura. El código recibe como valores de entrada la postura del robot y devuelve como valores de salida el ángulo de dirección y la velocidad lineal. En cuanto a los **Requerimientos en el simulador Gazebo**, se tienen el Canal de información por el que se lee la posición del robot, el cual está incorporado en el simulador, así

como el Canal de información por el que se publica la dirección determinada, teniéndose además canales de información de velocidad lineal y velocidad angular. En cuanto a los **Requerimientos en el robot real**, se tiene el Canal de información por el que se lee la posición del robot, el cual se realiza a partir de un canal que lee la velocidad angular del motor por el sensor encoder y, con estos, se convierte a posición en ‘x’ y ‘y’ mediante odometría. Para el caso del canal de información para publicar la velocidad y ángulo, se publica el ciclo de trabajo PWM de los motores izquierdo y derecho, los cuales se convierten a velocidad lineal y angular.

Algoritmo de evasión de obstáculos: Braitenberg, Miedo: Este algoritmo se encarga de tomar acción ante la detección de un obstáculo a partir de un sensor de proximidad. En el momento de detección de un obstáculo, el robot gira en la dirección contraria al obstáculo. El algoritmo 2 muestra el pseudocódigo del algoritmo de Braitenberg. El código calcula como salidas la velocidad lineal y velocidad angular del robot a partir las distancias de detección, los cuales equivalen a las áreas 1-12 y 2-11 de acuerdo con la Fig. 4 y 5. En cuanto a los **Requerimientos en el simulador Gazebo**, se tiene el Canal de información por el que se lee la proximidad de los obstáculos y objetos cercanos al robot, para el que se cuenta con un sensor LiDAR. En cuanto al canal por el que se publica la dirección y velocidad del robot corresponde al canal de velocidad lineal y velocidad angular. En cuanto a los **Requerimientos en el robot real**, se tiene el Canal de información por el que se lee la proximidad de un objeto, se cuenta con un sensor LiDAR. El canal de información por el que se publica la dirección y velocidad del robot son los dos canales de información de señal PWM.

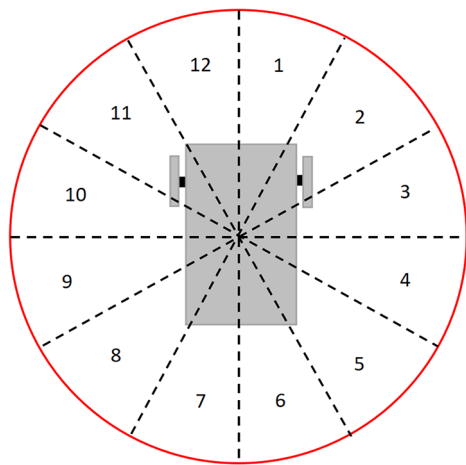


Fig. 4. Secciones establecidas para analizar datos obtenidos del LiDAR.

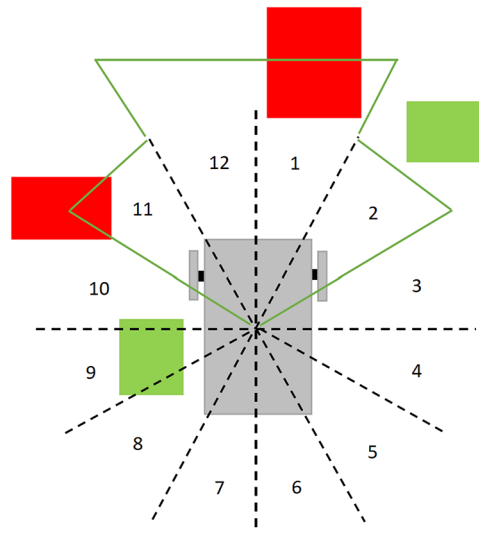


Fig. 5. Ejemplos de detección del algoritmo Braitenberg

Algoritmo 1 Pseudocódigo del algoritmo de Persecución Pura

Entradas Trayectoria (pre calculada) $[x_{ref}, Y_{ref}, \theta_{ref}]$, postura actual (Odometría)

Salidas δ, v

- 1: Parámetros: l, P_{Gain1}
- 2: Mientras No se envíe una señal de parada hacer
- 3: Obtener postura ($x_{actual}, y_{actual}, \theta_{actual}$)
- 4: Seleccionar un punto de la trayectoria pre calculada:
- 5: Leer puntos de trayectoria
- 6: Calcular al punto más cercano y su índice correspondiente en el arreglo de puntos.
- 7: Calcular radio de curvatura de arco que pasa por el punto deseado.
- 8: Calcular actuación para cumplir con el arco que pasa por el punto deseado:
- 9: Calcular δ tomando en consideración el derrape y convirtiendo a velocidad.

$$\omega_{angular} = V_{ref} / r \cdot \theta = P_{Gain2} \cdot \theta$$
- 10: Calcular v con $P_{Gain1} \cdot v_{lineal} = P_{Gain1} \cdot V_{ref}$
- 11: Enviar comando a los actuadores
- 12: fin

Algoritmo 2 Pseudocódigo del algoritmo de Braitenberg, Miedo

Entradas Lecturas de sensor LiDAR 360°

Salidas $v_{lineal}, v_{angular}$

- 1: Parámetros: *Turn Distance 1, Turn Distance 2, ΔSpeed, ΔTurn*
- 2: Mientras No se envíe una señal de parada o se colisione hacer
- 3: Obtener lecturas LiDAR
- 4: Computar los datos leídos:
- 5: Cantidad de segmentos y división
- 6: Distancias promedios $d_{prom1}, d_{prom2}, d_{prom11}$ y d_{prom12}
- 7: Si $d_{prom1} < Turn Distance 1$ or $d_{prom2} < Turn Distance 2$
- 8: $v_{lineal} = v_{lineal} - \Delta Speed$
- 9: $v_{angular} = v_{angular} - \Delta Turn$
- 10: O si $d_{prom12} < Turn Distance 1$ or $d_{prom11} < Turn Distance 2$
- 11: $v_{lineal} = v_{lineal} - \Delta Speed$
- 12: $v_{angular} = v_{angular} + \Delta Turn$
- 13: **O**
- 14: $v_{angular} = 0$
- 15:
- 16: **fin**

Mezcla de comportamientos con Persecución Pura y Braitenberg, Miedo: Este algoritmo se encarga de combinar Persecución Pura y Braitenberg, y se muestra en el pseudocódigo 3. El código posee como entrada las velocidades lineales y angulares de los algoritmos de Persecución Pura (Global) y Braitenberg (Local) y devuelve la velocidad lineal y velocidad angular del robot. Se utiliza una mezcla de comportamientos al adicionar las velocidades y direcciones determinadas en los algoritmos y multiplicar cada valor por un factor de peso, dando así una velocidad y ángulo ponderados, según la línea 6 y 7 del pseudocódigo.

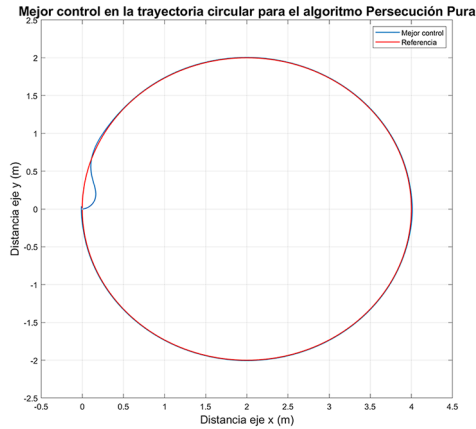


Fig. 6. Mejor control en el algoritmo Persecución Pura trayectoria circular, simulación.

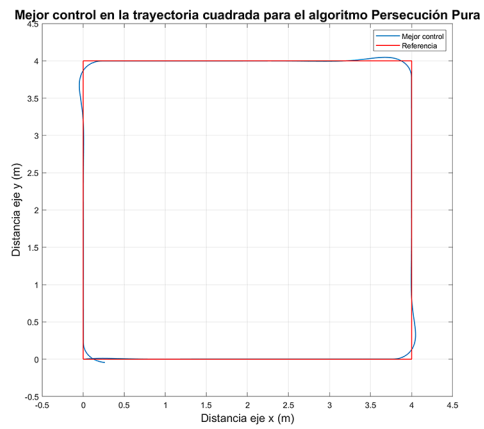


Fig. 7. Mejor control en el algoritmo Persecución Pura trayectoria cuadrada, simulación.

Algoritmo 3 Pseudocódigo del algoritmo de mezcla de comportamientos

Entradas $v_{lineal\ global}$, $v_{lineal\ local}$, $v_{angular\ global}$, $v_{angular\ local}$

Salidas v_{lineal} , $v_{angular}$

- 1: **Parámetros:** G_{SW} , L_{SW} , G_{STRW} , L_{STRW}
- 2: **Mientras** No se envíe una señal de parada o se colisione hacer
- 3: Obtener lecturas de datos del algoritmo de Persecución Pura
- 4: Obtener lecturas de datos del algoritmo de Braitenberg
- 5: Ponderar comando:
- 6: $Velocidad\ lineal\ resultante = G_{SW} \cdot v_{lineal\ global} + L_{SW} \cdot v_{lineal\ local}$
- 7: $Velocidad\ angular\ resultante = G_{STRW} \cdot v_{angular\ global} + L_{STRW} \cdot v_{angular\ local}$
- 8: fin

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Algoritmo de Persecución Pura, Simulación

En las figuras 6 y 7 se muestra el mejor control obtenido para las pruebas simuladas en la trayectoria circular y cuadrada. El error de la trayectoria circular se mantienen en valores inferiores al 1 %. Los picos al inicio y final se deben por ser valores cercanos a cero. El único error relevante es en los primeros datos, pero ese error se debe a la posición inicial del robot, el cual se desplaza hacia la trayectoria de referencia y disminuye el error. El error de la trayectoria cuadrada se mantienen en valores inferiores al 2 %. De igual forma, los picos al inicio y al final se deben por ser valores cercanos a cero y los picos intermedios se deben a las curvas.

B. Algoritmo de Braitenberg, Miedo, Simulación

La forma con la que el robot evade el obstáculo depende de la combinación de parámetros disponibles en el algoritmo. El robot detecta y evade correctamente el obstáculo colocado, según se observa en la Fig.8. Se aprecia además de la figura que el ajuste de parámetros puede resultar en una colisión del robot con el objeto o una evasión eficiente.

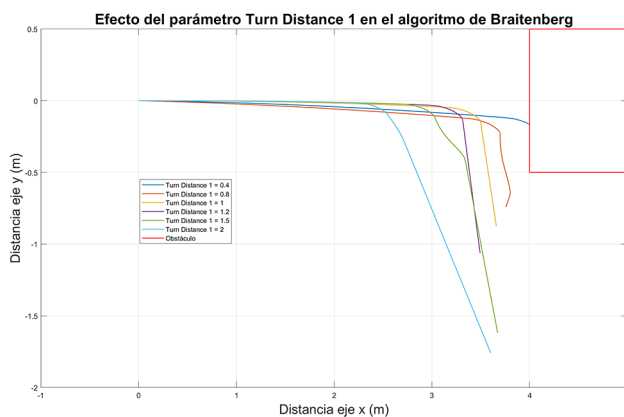


Fig. 8. Efectos de los parámetros en el algoritmo Braitenberg, simulación.

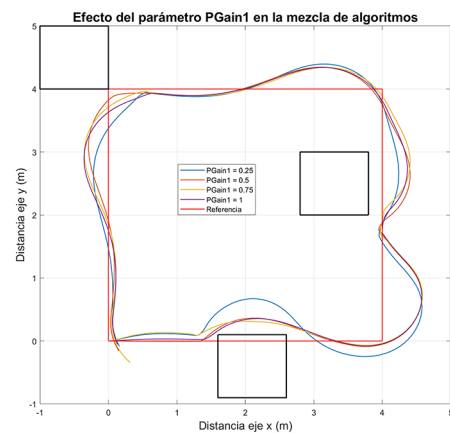


Fig. 9. Efectos de los parámetros en la mezcla de comportamientos, trayectoria cuadrada, simulación.

C. Mezcla de comportamientos, Simulación

Se realizaron las pruebas del algoritmo de navegación (mezcla de Persecución Pura y Braitenberg) en una trayectoria cuadrada con 3 obstáculos. El efecto de los parámetros permite verificar que tanto margen de espacio se deja entre el obstáculo y el robot, según se aprecia en la Fig. 9. Se observa una correcta evasión de obstáculos y seguimiento de trayectoria por parte del robot, ante la variación del parámetro P_{Gain1} probada.

D. Algoritmo de Persecución Pura, Prueba Real

En las figuras 10 y 11 se muestra los mejores seguimientos de trayectoria obtenidos. Los errores se deben principalmente a la cantidad de puntos en las trayectorias, esto generaba aumento en el tiempo de procesamiento, ocasionando que la instrucción llegara tarde al robot, lo cual será solucionado en un trabajo futuro al optimizar la ejecución del algoritmo propuesto en la plataforma real.

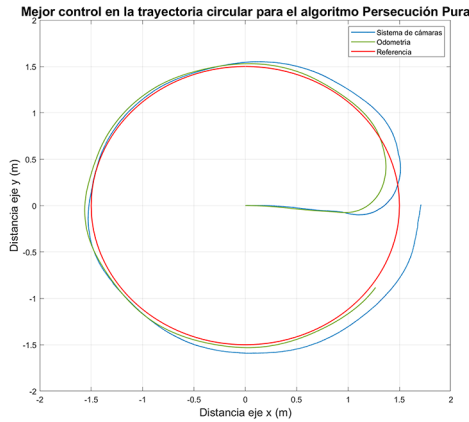


Fig. 10. Mejor control en el algoritmo Persecución Pura, trayectoria circular, prueba real.

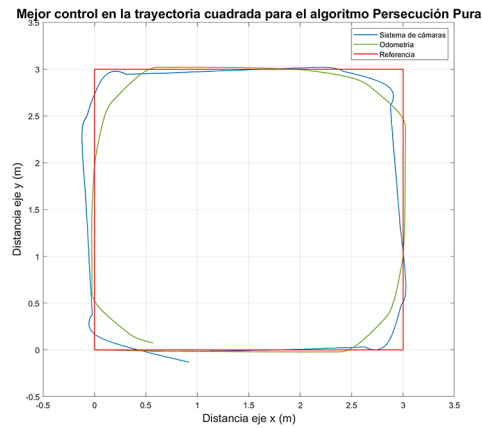


Fig. 11. Mejor control en el algoritmo Persecución Pura, trayectoria cuadrada, prueba real.

E. Algoritmo de Braitenberg, Miedo, Prueba Real

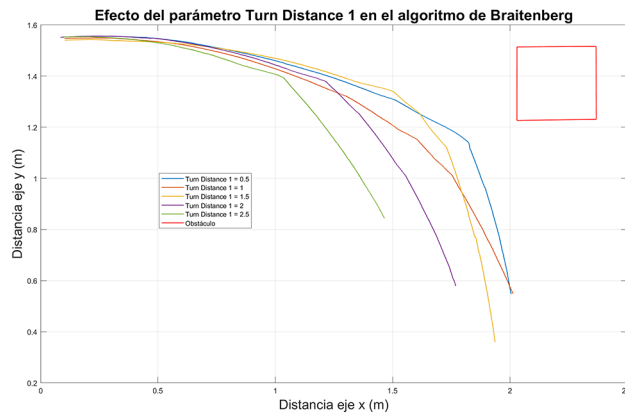


Fig. 12: Efectos de los parámetros en el algoritmo.

En la prueba real, al igual que en el simulador, la forma con la que el robot evado el obstáculo depende de la combinación de parámetros disponibles en el algoritmo. De la misma forma al caso simulado, el robot real detecta y evade correctamente el obstáculo colocado, según la Fig. 12.

En cada una de las pruebas reales, se realizó variación de parámetros en los cuales se obtuvieron el mismo efecto respecto a la simulación correspondiente. Ningún parámetro generó resultados opuestos o diferentes a los analizados en la simulación. Finalmente, en el CUADRO

I se muestra un resumen de los parámetros para los mejores controles en el seguimiento de trayectoria. En el caso del algoritmo de evasión de obstáculos no se genera una tabla de resumen debido a que en los parámetros no hay un valor mejor que otro. El ajuste de parámetros depende del objetivo, si se quiere que el robot lo evada con bastante o poca distancia respecto al objeto, o bien que lo evada rápido o lento, entre otras combinaciones que se puedan requerir.

CUADRO I.
TABLA DE RESUMEN DE PARÁMETROS DE MEJOR CONTROL
DEL ALGORITMO PERSECUCIÓN PURA.

Parámetro	Círculo		Cuadrado	
	Prueba real	Simulador	Prueba real	Simulador
PGain1	0.7	0.75	0.7	0.75
PGain1	3	1	10	1
PGain1	0.7	0.25	0.7	0.25

CONCLUSIONES

Se validó el correcto funcionamiento de los algoritmos de seguimiento de trayectorias, evasión de obstáculos y mezcla de ambos algoritmos en el software de Gazebo utilizando una trayectoria cuadrada, una trayectoria circular y un ambiente con obstáculos a partir de variación de parámetros y gráficos de error de desplazamiento. Una vez confirmado el funcionamiento de los algoritmos, se prosiguió a implementarlos en la plataforma real, en los cuales se validaron los algoritmos de Persecución Pura y Braitenberg con bajo margen de error. Por otra parte, el algoritmo de mezcla de comportamientos no se implementó en la plataforma real debido a problemas con el tiempo de procesamiento de las instrucciones, lo cual será solucionado en un trabajo futuro al optimizar la ejecución del algoritmo en la plataforma robótica real.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se desarrolla como parte de las labores de investigación del CERLab (*Control Engineering Research Laboratory*) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica. Esta investigación fue financiada por Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, proyecto número 322-C0-611.

REFERENCIAS

- [1] A. M. y. B. T. K. Shojaei, *Design and Implementation of an Inverse Dynamics Controller for Uncertain Nonholonomic Robotic Systems*. Iran University of Science of Technology, 2013.
- [2] A. Baturone, *Robotica. Manipuladores y Robots Mviles*. MARCOMBO, 2005.

- [3] Y. Rojas, *Estudio, comparación e implementación de algoritmos de navegación para el control de postura en robots móviles*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 2016.
- [4] K. Berns y E. Puttkamer, *Autonomous Land Vehicles. Steps towards Service Robots*. Sybille Thelen, Maren Mithofer, 2009.
- [5] A. Dattalo, *Introduction, Robotic Operating System (ROS)*, url:<https://wiki.ros.org/ROS/Introduction>, 2018.
- [6] T. Foote, *Tutorials, Robotic Operating System (ROS)*, url:<https://wiki.ros.org/ROS/Tutorials>, 2022.
- [7] P. Sanz, *Introducción a la robótica inteligente*, url:<https://www3.uji.es/sanzp/robot/RobInt-Apuntos.pdf>, 2006.
- [8] P. Hevia, *Implementación de middleware ROS para robot de servicio*. Universidad de Chile, 2012.
- [9] P. Biber y U. Weiss, *Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor*. 2011.
- [10] E. Rodríguez, *Implementación de algoritmos para navegación autónoma en una plataforma robótica móvil F1 a escala, en entornos de simulación virtual utilizando ROS*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica, 2021.

Módulo de ROS2 para la estimación de la posición y orientación de un sensor de fuerzas

ROS2 module for position and orientation estimation of a force sensor

Andrés Corrales Vargas

Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: andres.corralesvargas@ucr.ac.cr

Helber Meneses Navarro

Profesor e Investigador, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: helber.meneses@ucr.ac.cr

Federico Ruiz Ugalde

Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Aplicaciones robóticas, controles Razer Hydra, orientación, posición, Robot, Operating System.

Keywords:

Robotic applications, Razer Hydra controls, orientation, position, Robot, Operating System.

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un sistema basado en el uso de los controles de videojuego Razer Hydra que se acoplará a un brazo generador de fuerzas con el fin de estimar la dirección de dichas fuerzas que serán aplicadas al robot humanoide que se desarrolla en el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOSLab). Lo anterior con el fin de contar con un sistema de verificación de fuerzas que permita validar los resultados de la incorporación de un control por impedancia a la plataforma móvil de dicho robot con el fin de que este pueda manipular objetos largos y pesados mediante fuerzas de contacto.

ABSTRACT

In the present work, a system based on the use of Razer Hydra game controllers was developed to integrate with a force-generating arm. The goal is to estimate the direction of the forces that will be applied to the humanoid robot being developed in the Laboratory of Research in Autonomous Robots and Cognitive Systems (ARCOSLab). This is done to have a force verification system that validates the results of incorporating impedance control into the mobile platform of the robot. The purpose is to enable the robot to manipulate long and heavy objects through contact forces.

I. INTRODUCCIÓN

A. Motivación del proyecto

En el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOSLab) está en desarrollo un robot humanoide basado en una plataforma móvil omnidireccional que cuente con control de fuerza en todo su cuerpo [1], de tal forma que sea seguro con su entorno y que además, se puede aprovechar esta capacidad para manipular objetos pesados principalmente a través de su torso y plataforma móvil. En la literatura se encuentran trabajos que han buscado desarrollar un robot humanoide basado en una plataforma móvil que cuente con un control suave en la misma. Algunos de ellos presentan problemas de rigidez mecánica que hace que las señales de fuerza generadas por los sensores sean ruidosas y que además, el robot no se pueda usar para manipular objetos largos y pesados mediante fuerzas de contacto como en [2], [3]. Otros robots como los propuestos en [4] y [5] tienen la limitante de que hacen uso del control por admitancia (ver [6] y [7]) pero no poseen sensores de fuerza en su plataforma móvil para detectar contactos laterales, y por consiguiente, las capacidades de manipulación de objetos son limitadas. De momento el robot carece de ese control de fuerza o control por impedancia en su plataforma móvil, y para su implementación es necesario un sistema de referencia de fuerzas donde se estime tanto la magnitud de las fuerzas externas aplicadas a este, así como la orientación de dichas fuerzas. Por consiguiente, se diseñó un brazo, compuesto por celdas de carga basadas en el uso de galgas extensiométricas con el fin de medir la magnitud de dichas fuerzas y a este brazo se acoplaría un sistema para estimar la dirección de dichas fuerzas en relación con un marco de referencia definido para el robot. Para implementar este sistema de estimación de la dirección de las fuerzas, existen distintas alternativas, por ejemplo marker trackers de bajo costo económico, pero que presentan el problema de la oclusión, y actualmente en el laboratorio no se cuenta con un sistema de cámaras para poder estimar la posición y orientación con estos elementos. Otra alternativa podría ser el uso de un *motion tracker* pero, usualmente tiene un costo económico elevado y no contamos con un dispositivo de este tipo en el laboratorio. Por consiguiente, este proyecto tiene la finalidad de estimar la dirección de dichas fuerzas haciendo uso de los controles Razer Hydra de tecnología magnética que están disponibles en el laboratorio, y por ende, se implementó una interfaz de comunicación en Ubuntu (Linux) que permite usar los datos espaciales de posición y orientación de dichos controles dentro del middleware Robot Operating System (ROS2) para determinar la dirección de la fuerza externa sentida por el robot humanoide en relación con el marco de referencia del robot. Nótese que en este caso, las fuerzas externas se aplicarían al robot humanoide por un sistema al cual se acoplarán los controles Razer Hydra y de esta forma se podrá calcular la dirección de las fuerzas aplicadas. Finalmente dicha información se envía directamente al middleware ROS2 de tal forma que se puede guardar la información en un archivo de texto o usarse dentro de aplicaciones de ROS2.

B. Problema a resolver en el proyecto

La interfaz de programación de aplicaciones (API) de los controles Razer Hydra e incluso los mismos controles están completamente dirigidos al desarrollo de videojuegos y tienen la capacidad

de sensar la posición y orientación absoluta mediante sensores electromagnéticos integrados en los mismos. Este sistema, tal y como se muestra en la Fig. 1, e incluye una base (a la cual se conectan ambos controles) que actúa como el punto de referencia absoluto de los controles.



Fig. 1. Controles Razer Hydra. [8].

Al ser diseñados para videojuegos, los métodos de calibración de posición y orientación de los controles son muy básicos. Con las pruebas realizadas a dichos dispositivos, se determinó que los datos de posición y orientación presentaban grandes errores debido a inestabilidad y fluctuación indeseada en estos cuando los controles se utilizaban a una distancia muy lejana o muy cercana de la base. Es por esta razón que el fabricante [8] recomendaba utilizar los controles a una distancia mayor 60,96 cm pero menor a 91,44 cm. Además, dado que los controles usan sensores electromagnéticos, estos se ven afectados por interferencias electromagnéticas, y por lo tanto, los datos de posición y orientación que brindan los controles se ven afectados por circuitos eléctricos, como celulares o cables con corriente e inclusive por el mismo sol. Por consiguiente, para obtener datos coherentes de los sensores electromagnéticos, es indispensable mantener cualquier fuente de interferencia alejada, o en su defecto, lo más invariable posible. Debido a las razones anteriores, es que resultaba necesario el diseño y la implementación de algoritmos de calibración que brindaran datos más confiables. Por otro lado, la API de los controles no tenía soporte para poder utilizar los datos de movimiento de los controles dentro del middleware ROS2, por lo que se implementó una interfaz de comunicación que permitió que estos datos pudiesen ser utilizados, ya sea calibrados con los algoritmos implementados, o sin ningún tipo de calibración.

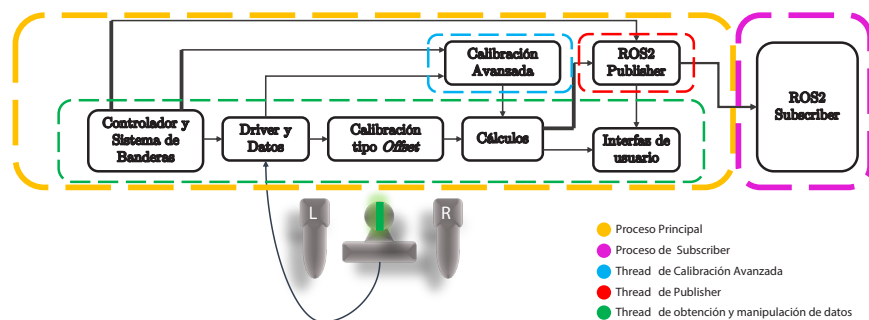


Fig. 2. Diagrama de bloques del funcionamiento del software implementado.

II. METODOLOGÍA

A. Estructura de software

Para la resolver el problema descrito en B, se implementó el diagrama de bloques mostrado en la Fig. 2 que está compuesto de dos procesos principales. El primero es un proceso principal (encerrado en amarillo) que integra todo lo relacionado a la obtención de datos de los controles, su calibración, su visualización y su publicación. Este a su vez está compuesto por un **controlador y sistema de banderas** que se encarga de controlar todo el proceso de obtención de datos, calibración, cálculos, interfaz de usuario y el *publisher* de datos, siempre está activo de inicio a fin en la ejecución del programa y todas las banderas del sistema de banderas son compartidas por el *publisher* mediante un bloque de datos al *subscriber*, un **driver y datos de controles Razer Hydra** que se encarga de actualizar o refrescar los datos de los controles Razer Hydra, el cual es inicializado y terminado por el controlador, un **subproceso de calibración** del *offset* que se encarga de hacer la calibración de la posición y orientación inicial de los controles respecto a su base y que es activado por el controlador cuando el usuario hace una petición de la calibración del *offset* y genera los datos para que el subproceso de cálculos calibre los datos, un **subproceso de calibración** avanzada que se implementa en un *thread* (en celeste) completamente aparte del *thread* del proceso principal (en verde) y se encarga de gestionar todos los pasos de la calibración avanzada, la lectura y escritura de un archivo de calibración avanzada y de la misma calibración de los controles cada vez que se refrescan los datos de estos, un **subproceso de cálculos** que se encarga de calcular los nuevos datos a partir de la calibración del *offset* o *avanzada* y que además, se encarga de generar la representación de orientación por medio de ángulos de Euler o por medio de cuaterniones, luego entrega los datos listos a la interfaz de usuario y al *publisher* de ROS2, para publicar los datos calibrados. En este subproceso también se generan los timestamps si el controlador así lo ordena, los cuales acompañan a los datos dentro de un bloque de datos, una **interfaz de usuario** que permite mostrar el estado actual del controlador al usuario, y en caso de que la interfaz sea la interfaz gráfica, permite mostrar los datos de los controles gráfica y numéricamente en tiempo real y finalmente, un **nodo *publisher* de ROS2** que se encarga de publicar los datos crudos o calibrados de los controles Razer Hydra, además de enviar las marcas de tiempo (*timestamps*) y las banderas del proceso principal (en amarillo) de manera que el *subscriber* sepa el estado actual de los controles, su calibración, si los datos se están publicando y demás información relevante y está implementado en un *thread* (en rojo) aparte. El segundo es un proceso del nodo *subscriber* de ROS2 (encerrado en rosado), que es un proceso separado del proceso principal, que recibe los datos de los controles Razer Hydra y los almacena en un archivo de texto. Además gracias al sistema de banderas, el *subscriber* tiene conocimiento de lo que ocurre con el proceso principal y le permite realizar acciones como terminarse si el proceso principal termina, saber si se están publicando datos, saber el modo de calibración utilizado, si los controles están conectados o se desconectaron, entre otras funciones.

B. Calibración del offset de posición y orientación

Para la calibración de posición sea $P = (x_p, y_p, z_p)$ el vector de coordenadas cartesianas que describe una posición cualquiera de un control Razer Hydra a nivel de software y $N = (x_n, y_n, z_n)$

el vector de nueva posición a nivel de software que corresponderá con la posición física en que se calibran los controles. Se busca obtener un vector de corrección $C = (x_c, y_c, z_c)$ que satisfaga la ecuación $P - C = N$. De esta manera, se obtiene el vector de corrección $C = (x_p - x_n, y_p - y_n, z_p - z_n)$.

Los resultados de la implementación de este algoritmo se muestran en la Fig. 3.



Fig. 3. Orientación de los controles a nivel virtual, antes (a) y después (b) de la calibración del *offset* de posición.

Para la calibración de orientación inicial sea R la matriz rotacional (ver definición en [9]) que describe una rotación cualquiera de un control Razer Hydra en una posición específica. Se busca obtener una matriz de corrección C donde R y C están dados por la ecuación (1)

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Que satisfaga $R \times C = I$. Por lo tanto, la matriz de corrección está dada por la ecuación (2)

$$C = \begin{bmatrix} \frac{r_{13}r_{22}-r_{12}r_{23}}{den} & \frac{-r_{13}r_{21}+r_{11}r_{23}}{den} & \frac{r_{12}r_{21}-r_{11}r_{22}}{den} \\ \frac{-r_{13}r_{32}+r_{12}r_{33}}{den} & \frac{r_{13}r_{31}-r_{11}r_{33}}{den} & \frac{-r_{12}r_{31}+r_{11}r_{32}}{den} \\ \frac{r_{23}r_{32}-r_{22}r_{33}}{den} & \frac{-r_{23}r_{31}+r_{21}r_{33}}{den} & \frac{r_{22}r_{31}-r_{21}r_{32}}{den} \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde den está dado por la ecuación (3).

$$den = r_{13}r_{22}r_{31} - r_{12}r_{23}r_{31} - r_{13}r_{21}r_{32} + r_{11}r_{23}r_{32} + r_{12}r_{21}r_{33} - r_{11}r_{22}r_{33} \quad (3)$$

Los resultados de la implementación de este algoritmo se muestran en la Fig. 4.



Fig. 4. Orientación de los controles a nivel virtual, antes (a) y después (b) de la calibración del ofsset de orientación.

C. Calibración avanzada

Con el algoritmo de calibración avanzada, se busca arreglar problemas de exactitud que no se pueden eliminar con los algoritmos de calibración de offset de posición y orientación. En cuanto a la calibración de posición, inicialmente el usuario debe definir la distancia máxima de calibración med_{max} medida desde el punto de origen de los controles hacia cualquier sub-eje x_+ , x_- , y_+ , y_- , z_+ y z_- . Luego el usuario debe mover físicamente los controles hacia el punto físico en que desea se encuentre el nuevo punto de origen. Asimismo, debe rotar los controles físicamente a la orientación que requiera sea la nueva orientación cero. En dicha posición y orientación se toman los datos de posición y la matriz rotacional de los controles varias veces y se calcula el promedio contando con la información requerida para la aplicación del algoritmo de calibración del offset. Posteriormente, se mueven los controles en cada uno de los sub-ejes x_+ , x_- , y_+ , y_- , z_+ y z_- (uno a la vez) y se toman varios datos de posición y orientación (se recomienda al menos 5) cada centímetro, hasta llegar a la distancia máxima definida en un inicio. Finalmente, el algoritmo corrige los problemas de exactitud en las mediciones de los controles mediante tres tipos de rectas diferentes, llamadas rectas de calibración. Estas se generan cada dos puntos de medición (incluido el punto de origen). Así, existen rectas diferentes para cada centímetro de cada uno de los sub-ejes, hasta llegar a la distancia máxima definida. Por consiguiente, los parámetros m y b de la recta de ajuste lineal $req = m med + b$ siendo req el valor corregido y med el valor medido para cada control se calculan como:

$$m = \frac{med_{max} - med_{min}}{coord_{max} - coord_{min}} \qquad b = med_{max} - m \times coord_{max} \qquad (4)$$

donde req_{max} corresponde al valor máximo requerido de la coordenada correspondiente al centímetro específico de un sub-eje en específico, req_{min} representa el valor mínimo requerido de la coordenada correspondiente al centímetro específico de un determinado sub-eje, med_{max} equivale al valor máximo medido de la coordenada correspondiente al centímetro específico de un sub-eje definido y med_{min} al valor mínimo medido de la coordenada correspondiente al centímetro específico de un sub-eje dado. Durante las pruebas experimentales realizadas se observó un efecto de interferencia cruzada debido a que cuando alguno de los controles se movía paralelo a

uno de los sub-ejes, se detectaban valores distintos de cero en los otros sub-ejes. Por lo tanto para resolver este problema también se crearon rectas de auto-corrección para cada control. El modelo lineal también se pueden calcular usando la ecuación (4). med_{max} y med_{min} , mantienen el mismo significado mencionado anteriormente, sin embargo, ahora req_{max} corresponde al valor máximo medido de una coordenada distinta de la coordenada correspondiente al centímetro específico dentro de un determinado sub-eje y req_{min} representa al valor mínimo medido de una coordenada distinta de la coordenada correspondiente al centímetro específico dentro de un sub-eje definido. El valor obtenido con este modelo lineal representa el valor que debe restarse a cada uno de los ejes en donde no se realizó ningún movimiento. En cuanto a la calibración avanzada de orientación también se crearon rectas de autocorrección que se calculan para cada entrada de la matriz rotacional. Estas rectas pretenden corregir el cambio en la orientación que se da al mover los controles de posición sin realmente haberlos rotado. En otras palabras, no se realiza calibración cambiando la orientación de los controles. Los parámetros m y b del modelo lineal $req = m med + b$ siendo req el valor corregido y med el valor medido para cada entrada de la matriz rotacional, se obtienen utilizando la ecuación (5)

$$m = \frac{med_{max} - med_{min}}{coord_{max} - coord_{min}} \quad b = med_{max} - m \times coord_{max} \quad (5)$$

donde med_{max} corresponde al valor máximo medido de la entrada de la matriz rotacional correspondiente al centímetro específico de un determinado sub-eje, med_{min} representa al valor mínimo medido de la coordenada correspondiente al centímetro específico dentro de un sub-eje definido, $coord_{max}$ equivale al valor máximo medido de la coordenada correspondiente al centímetro específico de un determinado sub-eje y $coord_{min}$ equivale al valor mínimo medido de la coordenada correspondiente al centímetro específico del sub-eje en cuestión.

III. EXPERIMENTO, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los experimentos realizados para corroborar la efectividad de los algoritmos de calibración diseñados e implementados, consistió en inicialmente hacer un proceso de calibración del *offset* de posición con un origen bien definido, y seguidamente, hacer un proceso de calibración del *offset* usando el mismo origen y efectuando un movimiento de un centímetro en el eje Z negativo, seguido de un centímetro en el eje X negativo, y repitiendo este movimiento hasta la distancia máxima definida, es decir, 40 mm para este experimento. Una vez finalizado este procedimiento, se debía devolver al origen definido por el usuario, seleccionar el modo de calibración *avanzada* y repetir el movimiento de 1 cm en los ejes Z y X hasta alcanzar la distancia máxima requerida. Los resultados de la calibración para el control izquierdo y derecho se muestran respectivamente en la Tabla 1 y en la Tabla 2. Dichos resultados muestran que la calibración avanzada presenta un error de exactitud mucho menor en relación con la calibración del *offset* y que al utilizar la primera se obtuvo un error máximo para el control izquierdo de hasta 6.4294 mm en el eje X y de hasta 4.43633 mm en el eje

Z. En el control derecho los errores máximos obtenidos fueron de 1.11834 mm y 0.4587 mm en los ejes X y Z, respectivamente. Los resultados de los CUADROS I y II demuestran que entre más pequeña sea la distancia del origen definido a los controles, menor es el error de exactitud alcanzado.

CUADRO I.
CALIBRACIÓN DEL OFFSET CONTRA CALIBRACIÓN AVANZADA AFUERA
DE LOS EJES PARA EL CONTROL IZQUIERDO.

Movimiento en ejes X y Z (mm)	Calibración del offset			Calibración avanzada		
	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z
-10	-18.7935	-1.61702	-12.1947	-10.6308	-0.72377	-10.8808
-20	-38.5058	-3.11772	-24.2408	-20.6936	0.139936	-21.3578
-30	-58.4306	-4.66053	-38.1515	-32.0318	0.890125	-31.9048
-40	-77.4827	-6.40112	-53.8366	-46.4294	-1.14674	-44.3633

CUADRO II.
CALIBRACIÓN DEL OFFSET CONTRA CALIBRACIÓN AVANZADA
AFUERA DE LOS EJES PARA EL CONTROL DERECHO.

Movimiento en ejes X y Z (mm)	Calibración del offset			Calibración avanzada		
	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z
-10	-19.3548	-1.19706	-6.51084	-10.7039	-1.08681	-9.68128
-20	-39.8281	-3.2299	-12.9107	-20.1762	-2.78301	-20.4587
-30	-61.2615	-4.44768	-20.4283	-30.9836	-2.22449	-29.7404
-40	-83.4765	-6.13996	-28.9767	-41.1834	-3.19256	-39.6965

CONCLUSIONES

Las pruebas experimentales desarrolladas determinaron que las especificaciones de exactitud de los controles Razer Hydra en cuanto a posición y orientación no correspondían a las indicadas por el fabricante. Además, se determinó que la frecuencia máxima de operación de los controles corresponde a 259 Hz. En segundo lugar, se diseñó e implementó el algoritmo de calibración *offset* que permitió al usuario definir la posición origen y la orientación cero en cualquier posición y orientación física de los controles. En tercer lugar, se evaluó el algoritmo de calibración del *offset* alcanzando resultados satisfactorios y se observó además el efecto aleatorio provocado por fuentes de interferencia electromagnética sobre la posición y orientación de los controles. En cuarto lugar, se diseñó e implementó un algoritmo de calibración más avanzado que permitiera resolver los problemas de exactitud en las mediciones de posición y orientación encontrados al modificar la posición u orientación de los controles una vez realizada la calibración del *offset*. Este algoritmo se

implementó de forma que se tuviera un proceso de calibración amigable con el usuario y que no afectara el rendimiento en la obtención y publicación de datos. Esto último delegando esta tarea a un procesador separado mediante *multithreading*. En quinto lugar, se diseñó una interfaz en ROS2 que permitiera la publicación de datos de posición y orientación de los controles Razer Hydra, la publicación del momento exacto en que los datos son tomados y la publicación del estado de los controles dentro del *middleware* ROS2. En sexto lugar, se implementó una interfaz en ROS2 que permitiera suscribirse a los datos publicados con el fin de que estos pudiesen ser fácilmente utilizados en otras aplicaciones dentro de ROS2. Finalmente, se pudieron utilizar los controles Razer Hydra como parte de un brazo generador de fuerzas para estimar la dirección de las mismas respecto a un marco de referencia en el robot.

REFERENCIAS

- [1] I. Chaves y F. Ruiz, < Desarrollo de un robot humanoide de cuerpo completo para manipulación de objetos,> *Jornadas de Investigación 2021*, 2021.
- [2] K. S. Kim, A. S. Kwok, G. C. Thomas y L. Sentis, < Fully omnidirectional compliance in mobile robots via drive-torque sensor feedback,> en *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, págs. 4757-4763. DOI: 10.1109/IROS.2014.6943239.
- [3] M. Kollmitz, D. Büscher, T. Schubert y W. Burgard, < Whole-Body Sensory Concept for Compliant Mobile Robots,> en *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2018, págs. 5429-5435. DOI: 10.1109/ICRA.2018.8460510.
- [4] A. Dietrich, K. Bussmann, F. Petit et al., < Whole-body impedance control of wheeled mobile manipulators,> *Autonomous Robots*, vol. 40, n.o 3, págs. 505-517, 2016, ISSN: 1573-7527. DOI: 10.1007/s10514-015-9438-z.
- [5] M. Iskandar, G. Quere, A. Hagenhuber, A. Dietrich y J. Vogel, < Employing Whole-Body Control in Assistive Robotics,> en *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2019, págs. 5643-5650. DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8967772.
- [6] A. Q. Keemink, H. van der Kooij y A. H. Stienen, < Admittance control for physical human-robot interaction,> *The International Journal of Robotics Research*, vol. 37, n.o 11, págs. 1421-1444, 2018. DOI: 10.1177/0278364918768950. eprint: <https://doi.org/10.1177/0278364918768950>. dirección: <https://doi.org/10.1177/0278364918768950>.
- [7] C. Ott, R. Mukherjee e Y. Nakamura, < Unified Impedance and Admittance Control,> en *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, págs. 554-561. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509861.
- [8] Razer, *Razer Hydra Support*, <https://support.razer.com/console/razer-hydra/>, 2023.
- [9] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani y G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer-Verlag London, 2009.

Infraestructura de Hardware y Software para expresiones emocionales de un robot humanoide

Hardware and Software infrastructure for emotional expressions of a humanoid robot

Daymer Alberto Vargas Vargas

Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

e-mail: daymer.vargas@ucr.ac.cr

Federico Ruiz Ugalde

Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR

e-mail: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr

Palabras clave:

Expresiones robóticas, Valle inquietante, Librería de emociones robóticas, sistemas cognitivos, Robot Humanoide.

Keywords:

Robotic Expressions, The Uncanny Valley, Robotic Emotions Library, Cognitive Systems, Humanoid Robot.

RESUMEN

En este artículo se presenta el desarrollo de la infraestructura para permitir a un robot humanoide mostrar expresiones emocionales, dicha infraestructura hace uso de recursos de hardware y software. El hardware realiza los movimientos mecánicos para transmitir la apariencia deseada, utilizando cejas, ojos, mandíbula y orejas. Además, el software del sistema, permite controlar los distintos componentes y enviar matrices de colores y vector de ángulos para mostrar las expresiones faciales. Se concederán aspectos importantes relacionados a la apariencia del robot, el valle inquietante representa una teoría sobre como se debe ver un robot para no generar terror en los espectadores. Para construir las emociones se estudian distintos robots humanoides como lo son Icub, Eddie y Kimet, para explorar como intentar recrear las expresiones faciales y también, se considera la relación del color con los estados de ánimo. Se implementan diversas expresiones emocionales como feliz, triste, enojado y se muestra las ejecuciones de toda la infraestructura en el robot.

ABSTRACT

In this article is presented the development of the humanoid robot's infrastructure capable of showing emotional expressions, that structure uses hardware and software resources. The hardware is in charge of the mechanic's movements to transmit the desired appearance, using eyebrows, eyes, jaw and ears. Also, the system software allows to control different components and send color's arrays and angle's vectors to show facial expressions. Important aspects will be granted to the robot's appearance, the uncanny valley theory explains how a robot should look in order to not be scary to the spectators. In order to build

emotions, some different robots were studied like Icube, Eddie and Kimet in order to explore how to recreate facial emotions and consider the relation between color and frame of mind. Some diverse expressions are implemented such as happiness, sadness, anger and it shows all robot's structure's execution.

I. INTRODUCCIÓN

Los robots están cada vez más presentes en las vidas cotidianas de las personas, donde en muchas ocasiones realizan trabajos no colaborativos, pero con el avance de la tecnología se está logrando que los robots brinden servicios y colaboren directamente con los humanos en los mismos espacios de trabajo sin rejas ni protecciones. El objetivo del robot humanoide del laboratorio de Robots Autónomos y sistemas cognitivos "ARCOSLAB" es trabajar en conjunto con las personas en ambientes dinámicos y entornos humanos, donde sus tecnologías permiten ser cuidadosos con las personas y desempeñar tareas de manipulación de objetos y actividades de la vida cotidiana [1] [2] [3].

En estos ambientes la comunicación entre humano y robot es muy importante, para ello se plantea como objetivo de este artículo, construir una infraestructura de hardware y software en el robot humanoide del ARCOS-LAB para implementar expresiones fáciles. Así como los humanos tienen la capacidad de comunicarse de manera no-verbal entre otros humanos y brindar referencias negativas o positivas [4], los robots humanoides también, buscan la capacidad de realizar transmisión de expresiones emocionales, para saber su estado de forma inmediata. El robot puede mostrar expresiones fáciles como triste, feliz, disgustado o enojado según el usuario lo seleccione, también, pueden verse en función de sus estados internos o sus alrededores. Además, se busca esta habilidad debido a la presencia de robots en la sociedad [5].

El robot debe interactuar con humanos, para ello es importante tomar en cuenta la apariencia física del robot, por ejemplo en el trabajo de Akanksha Prakash y Wendy Rogers, se hace un análisis de la teoría más popular sobre el efecto de la apariencia de los robots sobre las personas el Valle inquietante o "The Uncanny Valley", esta teoría relaciona el nivel de familiaridad, viéndose cómo que tanto se acepta al robot sin que de miedo, con la semejanza humana que tenga [6]. La figura 1a muestra el comportamiento. Los robots humanoide con brazos, torso, cabeza, etc. Se hace más familiar con el humano mientras que su apariencia no intente ser humana, el problema está en cuando se pretende que el robot se parezca a un humano, debido a que por detalles mínimos, el robot puede generar el sentimiento de estar viendo a un cadáver o un zombi. Para lograr incrementar esta familiaridad, el robot debe verse prácticamente idéntico a un humano [7].

Muchos robots humanoides como los geminoides o el mask-bot,[8] [9] [10] se arriesgan a presentar un concepto realista y buscan crear un robot igual a un humano. En la figura 1c se muestra el Geminoid F en la izquierda y la persona a modelar a la derecha, una motivación para crear un robot altamente antropomórfico es investigar la naturaleza humana, en cómo la apariencia y la manera de comportarse, influyen en la impresión que se da, además, de lograr en un futuro mezclar robots en la sociedad, donde los humanos vean a los robots como actores sociales [8]. Por otro lado el maskbot [10] trata de resolver el problema del valle del terror proyectando una cara virtual, como se observa en la figura 1b.

Otros robots como Icub, Kismet, Eddie y Nexi,2b [11] [12] [13] se apegan a un estilo robótico y se alejan un poco del marco realista, esto permite se alejen de la parte baja del valle inquietante. Como se observa el Eddie, Kismet y Icub en la figura 2b, tienen similitudes a los humanos, pero no se llegan a parecer demasiado a ellos y se mantiene con una clara apariencia robótica. Para efectos de este trabajo esta es la idea que se desea optar, pues la intención no es estudiar el comportamiento humano en los gestos, si no tener una infraestructura para transmitir expresiones emocionales y además, alejarse del valle inquietante. Se busca mantenerse lejos de este Valle, utilizando formas geométricas y optando por un rostro cuadrado y metálico. El robot humanoide Icub o Nexi, tienen el propósito de tener una interacción entre humano y robot con las expresiones faciales [13], para ello este robot utiliza un recurso muy importante para mostrar expresiones emocionales, y son las cejas, para Icub la ausencia de cejas tuvo más impacto negativo en el reconocimiento facial que la ausencia de los ojos, por ende las cejas son parte fundamental del diseño [14].

Eddie y Kimet utilizan otro recurso a tomar en cuenta, y son las orejas, Eddie utiliza unas inspiradas en los dragones [12], donde ellos generan mucha expresividad, así lo hacen los animales. También, estos robots utilizan una mandíbula para expresarse.

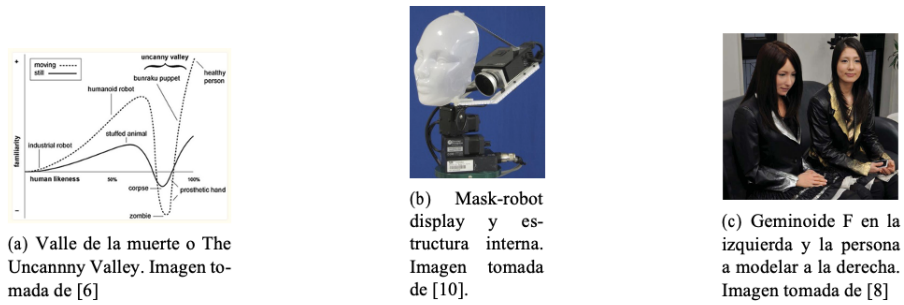


Fig. 1. The Uncanny Valley, Geminoid F y Mask-bot.

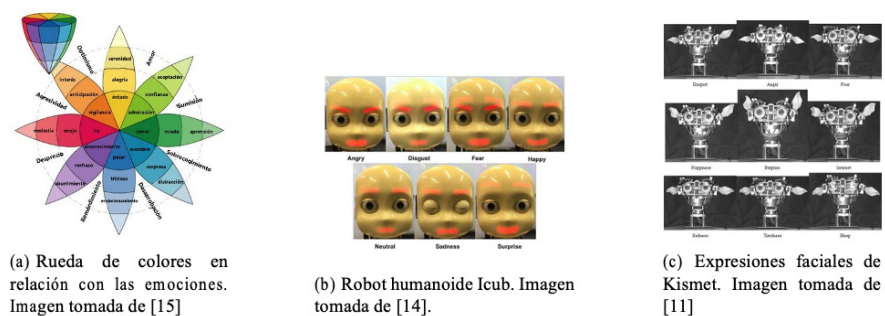


Fig. 2. Robot Icub, rueda de emociones y expresiones de Kismet.

Estos robots tiene características similares, en su mayoría tienen ojos, cejas, mandíbula y orejas, donde se buscan acercar estos rostros a como son los humanos, sin llegar buscar la perfección, pero si la similitud, como Eddie que presenta una mandíbula roja para aproximarse a los labios de los

humanos, o las cejas de Icube como se muestran en la figura 2b, en síntesis una cara familiar y amigable permite una buena interacción entre los humanos y los robots. Justamente estas características son utilizadas para la infraestructura de nuestro sistema.

II. METODOLOGÍA

A. Hardware:

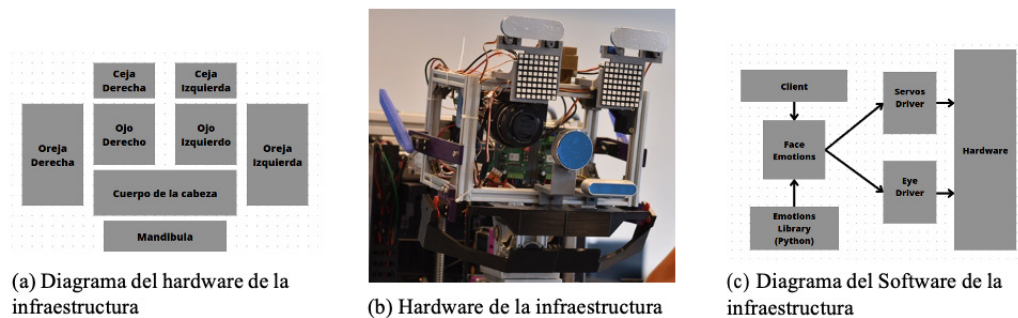


Fig. 3. Infraestructura del sistema.

El hardware es el encargado de contener todas las piezas mecánicas e iluminarias de la infraestructura del robot humanoide del ARCOS-LAB. Esta cabeza fue previamente diseñada, donde sus especificaciones y configuración se encuentran en el documento [16] y en [2].

En términos generales la cabeza se compone de una **mandíbula** movida por dos servos, dos **cejas** cada una movida por dos servos, un par de **orejas** dirigidas cada una con un solo servo y dos paneles led que representan los ojos del robot, la configuración se observa en el diagrama de la figura 3a y en la figura 3b la cabeza del robot con su hardware.

Las cejas del robot no siguen la misma forma convencional en este caso cada ceja posee dos servomotores donde uno se encuentra distanciado por una barra, y el otro servo presenta una franja de movimiento en la ceja, esto permite alcanzar mejores ángulos de inclinación en ambas orientaciones.

Los ojos son parte fundamental de la infraestructura, para más expresividad se utilizan dos paneles led 8x8. Esto permite tener aun más expresividad en la cara del robot, ya que se pueden mostrar figuras que hagan alusión a las distintas emociones, y poder utilizar el recurso del color a favor.

B. Software:

Para manejar todo el equipo electrónico mencionado, es necesario programarlo y acá entra la sección del software, donde se realizan los controladores de los servos y de los paneles, configuración que se aprecia en la figura 3c. Además, de configurar las emociones a mostrar basadas en otros

robots y los colores y su significado. Con ello se realiza un análisis documental de formas y colores que se relacionan con distintas emociones humanas para que el robot sea capaz de aproximarlos lo mejor posible.

Es primordial empezar en definir la diferencia entre una expresión facial y una emoción, pues sus términos son relacionados, pero no son lo mismo, donde una emoción activa en las personas las expresiones faciales, esto quiere decir que las emociones son el conjunto de eventos o experiencias subjetivas que generan un estímulo, donde este estímulo conlleva a la expresión facial, lo cual es el movimiento muscular de la cara que indican una respuesta emocional. [17].

C. Los colores y las emociones:

Como se explicó, las emociones se basan en experiencias subjetivas de las personas, así pues con el diario vivir de las personas, los colores llegan a adoptar significados en la subjetividad de los sujetos, como al ver el color rojo, puede traer recuerdos de sangre o de peligro, también, el color azul que puede traer recuerdos de un día lluvioso, pues así como se relacionan colores con experiencias se relacionan colores con emociones.

Las emociones son una serie de eventos que ocurren en la cabeza que según el patrón, desenlazan siempre las mismas expresión, existe una rueda de colores elaborada por Rober Plutchik que refleja los colores y las emociones, esta rueda se observa en la figura 2a.

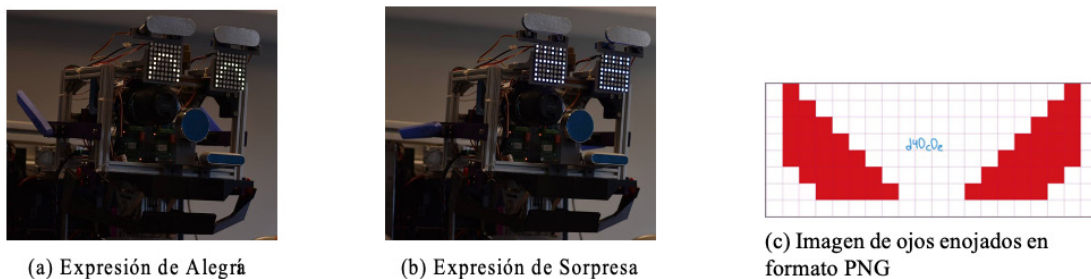


Fig. 4. Imagen de los ojos de ira y expresiones faciales.

D. Emociones en otros robots y ambiente de software:

Como ya se ha mencionado, existen otros robots que muestran emociones sin la necesidad de ser idénticos a los humanos, de estos robots se tomaron inspiraciones para crear los gestos de las cejas de las emociones. Icube es el robot que posee cejas para mostrar emociones [14].

Por último, se muestran las emociones de otro robot que se había mencionado, este es Kimet, donde las emociones se pueden observar en la figura 2c y se presenta un comportamiento en las cejas y orejas similar al visto en los anteriores robots.

Para crear los drivers de los servos permiten que tengan un movimiento fluido, donde ellos se desplazan de forma controlada hasta su posición de destino, por ende el cambio no es abrupto.

El driver es programado en Robot Operations System 2 (ROS2), donde permite crear tópicos que esperan los datos de instrucciones para mover los servos.

El driver de los paneles leds, también, se encuentra programado con ROS2, para crear la matriz de colores, se diseñó en Krita, un software gratuito de dibujo, una imagen de 8*16 píxeles como la figura 4c, la cual es procesada por un programa creado en Python, que retorna la matriz de colores de la imagen. Además, de los drivers, se realiza un publicador en ROS2, el cual como su nombre lo indica, se encarga de publicar en los tópicos de los drivers, el vector de ángulos y matriz de colores de la emoción que el usuario escogió.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A. Hardware:

A la hora de realizar distintas pruebas en las expresiones, se encontraron algunos problemas en el hardware del sistema, durante las pruebas ocurría que los servomotores de las cejas llegaban a límites mecánicos, esto se debía que la posición de un servo, forzaba al otro, y lo quemaba, para ello se debieron realizar pruebas, donde se ajustaron los ángulos de las expresiones, aun así en ocasiones se escuchan un ruido fuerte por parte de los servos, debido al peso de las cejas.

Para la mandíbula se debieron alinear los dos servos, por la misma razón descrita anteriormente, además, se debe limitar el ángulo de apertura debido a que la mandíbula colisiona con el cuello del robot, y el límite de altura debido a que colisiona con los labios superiores.

Continuando con los ojos del robot, esos a lo largo del tiempo se fueron quemando, debido a interferencia electromagnética en los cables, ya que al revisarlos su topología era la indicada por el fabricante, pero más allá de eso, se descubrió al revisar distintos foros, que estos paneles presentaban el mismo problema a distintos usuarios, eran muy susceptibles a interferencias electromagnéticas. Para solucionarlo se debe implementar un circuito de protección en las entradas de datos y poder de los paneles, el cual se encuentra en desarrollo.

Las expresiones faciales se logran mostrar fijas, esto quiere decir que el hardware llega a posiciones específicas y no se mueve de ahí hasta que otra emoción se le indique, una sugerencia es la implementación de animaciones en los paneles leds, donde el robot es capaz de parpadear, o variar las tonalidades, además, de tener pequeños movimientos en los servos congruentes a la expresión, para dar expresiones con mayor dinámica.

B. Software:

Para este artículo, se crearon 8 emociones distintas, donde cada una de ellas fue planeada con la inspiración de los distintos robots mencionados para las cejas, orejas y mandíbula, además, de expresiones faciales de humanos reales. Para los ojos se utiliza el color correspondiente a la emoción según la rueda de colores mencionada 2a y las forma de los ojos se realiza con base en series y

películas animadas como "love, dead and robots.o Robots", subjetividad en función a experiencia en desarrollo de personajes y del análisis de las formas de la cara real de las e a distintas emociones.

La primera etapa fue conceptualizar las emociones, para esto se realizaron bocetos de como serian los ojos, y se adaptaron a la limitante de un panel 8x8 leds, para proseguir con las cejas, con las cuales se buscó la mejor expresión y se calcularon las posiciones angulares a las cuales los servos debían llegar para mostrar la expresión, al igual que con las cejas y la mandíbula. De lo anterior se crea una librería de emociones en Python, donde el software encargado de enviar las instrucciones a los controladores de los distintos dispositivos toma las matrices de color y vector de ángulos para mostrar la emoción satisfactoriamente.

Un inconveniente presentado es la limitante de colocar imágenes con movimiento en las expresiones, actualmente una expresión se ejecuta y se queda estática hasta que se envíe otra, se recomienda mostrar animaciones en los paneles, donde la animación sea como un tipo de video en ciclo, además, otra situación acontece cuando dos clientes intentan enviar una emoción, pues el software va a ejecutar la última que reciba, sin importar quien la envió, pero no es necesario contemplar dos clientes, pues el robot en función de su lado interno, acontecimientos en su entorno o expresión de las personas presentes, será quien tome la decisión de cuál emoción mostrar a las personas.

Finalmente se construyen las emociones de **Alegría**: Como se observa en la figura 4a, se ve al robot con una expresión facial alegre, donde predominan cejas levantadas y en los ojos el color amarillo. **Sorpresa**: La figura 4b representa la expresión de sorpresa, donde se observa los paneles con una forma cuadrada de color cian y arriba unas líneas dando a entender un impacto. **Miedo**: En figura 5a, donde el color verde simbolizando terror. **Tristeza**: La figura 5b, donde se utiliza un color azul claro y con ojos en forma de media luna. **Ira**: La figura 5c donde se presentan unos ojos agresivos con cortes bruscos, con un color rojo, las orejas se van hacia delante como amenaza y la mandíbula se abre como si estuviera gritando, además, las cejas se inclinan hacia el centro siguiendo la forma de los ojos. **Disgusto**: La figura 5d. **Llorar**: La figura 5e. **Enamorado**: La figura 5f.

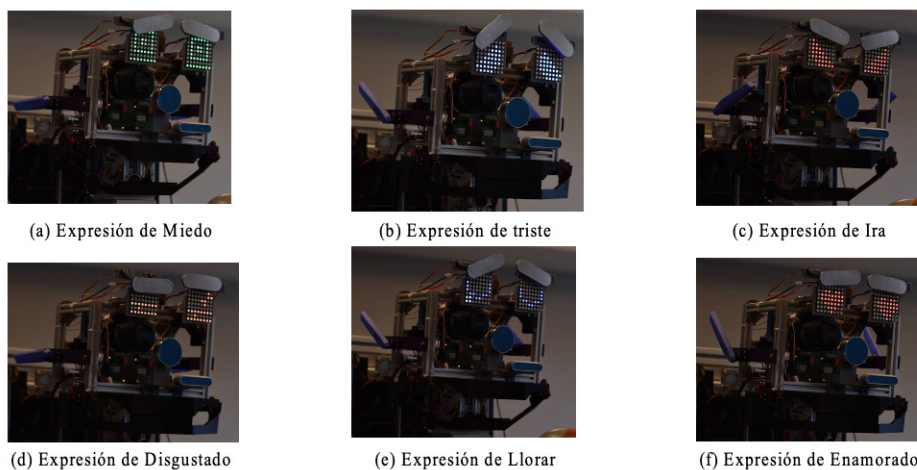


Fig. 5. Expresiones emocionales.

CONCLUSIONES

1. Se logra implementar una estructura de hardware y software en el robot humanoide del ARCOS-LAB capaz de transmitir expresiones emocionales, donde los elementos básicos del hardware como cejas, orejas, mandíbulas y ojos permite mostrar las expresiones más acertadas.
2. Se logran implementar unas cejas de mayor movilidad que las vistas en otros robots, donde las implementadas son capaz de lograr ángulos más pronunciados, como en la expresión de triste o la expresión de ira.
3. Se recomienda una implementación de cámaras de alta resolución, tiempo infrarroja y térmica, para capturar emociones en las personas que vean al robot, y que este sea capaz de reconocer como se sienten, esta recomendación es una posible contención de este proyecto.
4. Se recomienda realizar mejoras al hardware o software de los servomotores, donde haya una relación entre los ángulos de ambos servos, para que trabajen en conjunto y además, implementar un circuito de protección en los paneles leds para reducir la interferencia electromagnética.
5. La configuración de hardware y software utilizado puede ser modificado en cualquier momento, para agregar emociones, modificarlas, y agregar alguna mejora al hardware. Además, se destaca que las emociones aún no han sido evaluadas, se recomienda realizar encuestas sobre que expresión emocional se transmite y en base a esa estadística realizar cambios.

AGRADECIMIENTOS

Se le agradece a la Universidad de Costa Rica y la escuela de ingeniería eléctrica por brindar el material y equipo necesario como impresoras 3D, soldadoras y componentes electrónicos para la construcción de la infraestructura, además, al Instituto de investigaciones en ingeniería por el apoyo logístico.

REFERENCIAS

- [1] I. C. Arbaiza y F. R. Ugalde, < Desarrollo de un robot humanoide de cuerpo completo para manipulación de objetos,> Jornadas de Investigación 2021, 2021.
- [2] I. C. Arbaiza y F. R. Ugalde, < Integración de un torso, base móvil y una cabeza, para un robot humanoide,> Universidad de Costa Rica, 2021.
- [3] F. D. S. Bonilla, < Integración del hardware y software del robot humanoide del ARCOS-LAB de la EIE,> Universidad de Costa Rica, 2017.
- [4] M. Aoki, K. K. Balasubramanian, D. Torazza et al., < A Novel Wire-driven 3D Eyebrow Design for Communication with Humanoid Robot iCub,> en *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022, págs. 8248-8254. DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981954.
- [5] C. Chen, O. G. Garrod, J. Zhan, J. Beskow, P. G. Schyns y R. E. Jack, < Reverse Engineering Psychologically Valid Facial Expressions of Emotion into Social Robots,> en *2018 13th IEEE*

- International Conference on Automatic Face Gesture Recognition (FG 2018)*, 2018, págs. 448-452. DOI: 10.1109/FG.2018.00072.
- [6] A. Prakash y W. A. Rogers, *Why some humanoid faces are perceived more positively than others: Effects of human-likeness and task*, abr. de 2015. dirección: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4539254/>.
- [7] J.-j. Cabibihan, M. C. Carrozza, P. Dario, S. Pattofatto, M. Jomaa y A. Benallal, < The Uncanny Valley and the Search for Human Skin-Like Materials for a Prosthetic Fingertip,> en *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2006, págs. 474-477. DOI: 10.1109/ICHR.2006.321315.
- [8] C. Becker-Asano y H. Ishiguro, < Evaluating facial displays of emotion for the android robot Geminoid F,> en *2011 IEEE Workshop on Affective Computational Intelligence (WACI)*, 2011, págs. 1-8. DOI: 10.1109/WACI.2011.5953147.
- [9] C. Becker-Asano, K. Ogawa, S. Nishio y H. Ishiguro, < Exploring the uncanny valley with Geminoid HI-1 in a real-world application,> en *Proceedings of IADIS International conference interfaces and human computer interaction*, 2010, págs. 121-128.
- [10] T. Kuratate, Y. Matsusaka, B. Pierce y G. Cheng, < “Mask-bot”: A life-size robot head using talking head animation for human-robot communication,> en *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2011, págs. 99-104. DOI: 10.1109/Humanoids.2011.6100842.
- [11] R. Brooks, A. Smith y B. Scassellati, < Foundations for a Theory of Mind for a Humanoid Robot,> jul. de 2001.
- [12] S. Sosnowski, A. Bittermann, K. Kuhlentz y M. Buss, < Design and Evaluation of Emotion-Display EDDIE,> en *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, págs. 3113-3118. DOI: 10.1109/IROS.2006.282330.
- [13] T. Allman, *Nexi Robot, The*. Norwood House Press, 2009.
- [14] M. Aoki, K. K. Balasubramanian, D. Torazza et al., < A Novel Wire-driven 3D Eyebrow Design for Communication with Humanoid Robot iCub,> en *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2022, págs. 8248-8254. DOI: 10.1109/IROS47612.2022.9981954.
- [15] D. Goleman, < La rueda de las emociones de Robert Plutchik,> 2012. dirección: <http://soberanamente.com/la-rueda-de-las-emociones-de-r-plutchik/>.
- [16] J. C. H. Espinoza, < Diseño de una cara emocional para un robot humanoide Laboratorio de Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-LAB),> Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2016.
- [17] D. Matsumoto, H. S. Hwang, R. M. López y M. Á. Pérez-Nieto, < Lectura de la expresión facial de las emociones: Investigación básica en la mejora del reconocimiento de emociones.> *Ansiedad y estrés*, vol. 19, 2013.

Energías renovables, y gestión ambiental

Control de un aerogenerador de alta potencia

Control of a high-power wind-turbine generator

Sebastián Madrigal Ballesteró

*Escuela de Ingeniería Eléctrica, Instituto de Investigación en Ingeniería,
Facultad de Ingeniería, UCR
e-mail: sebastian.madrigalballesteró@ucr.ac.cr*

Daniel Campos Salas

*Escuela de Ingeniería Eléctrica, Instituto de Investigación en Ingeniería,
Facultad de Ingeniería, UCR
e-mail: danielantonio.campos@ucr.ac.cr*

Orlando Arrieta Orozco

*Instituto de Investigación en Ingeniería,
Facultad de Ingeniería, UCR
e-mail: orlando.arrieta@ucr.ac.cr*

Ramon Vilanova Arbos

*Departament de Telecomunicació i d'Enginyeria de Sistemes,
Universitat Autònoma de Barcelona
e-mail: ramon.vilanova@uab.es*

Palabras clave:

Aerogenerador, Controlador, Optimización, PID, Regulatorio.

Keywords:

Wind-Turbine, Controller, Optimization, PID, Regulatory.

RESUMEN

Este trabajo consiste en la descripción de los pasos seguidos para llegar al diseño de un controlador propuesto para un proceso de un aerogenerador de alta potencia. A partir de un problema de control que consiste en mantener la potencia generada por el aerogenerador en su valor nominal, manipulando el ángulo del pitch de la turbina. A partir del proceso cuya dinámica se describe por medio de Simulink y OpenFAST, se identifica un modelo mediante experimentación y puntos en la curva de reacción. El controlador diseñado parte de un conjunto de parámetros iniciales obtenidos por el método IMC y se busca realizar un ajuste de los parámetros iniciales del mismo. Posteriormente, se modifica el esquema de control original para integrar un mecanismo Anti-WindUp. Finalmente, se optimizan los parámetros del controlador PI estándar diseñado, utilizando una función de costo con valores del IAE de las variables controladas ω_g y P_g y el esfuerzo de control del pitch TV_{pitch} para obtener el mejor desempeño posible

ABSTRACT

This work consists of describing the steps followed to reach the design of a proposed controller for a high-power wind turbine process. Starting from a control problem of maintaining the generated power by the wind turbine at its nominal value by manipulating the pitch angle of the turbine. Based on the process, whose dynamics are described using Simulink and OpenFAST, a model is identified through experimentation and reaction curve points. The designed controller starts from a set of initial parameters obtained through the IMC method, and an adjustment of the initial parameters is sought. Subsequently, the original control scheme is modified to integrate an Anti-WindUp mechanism. Finally, the parameters of the designed standard PI controller are optimized using a cost function with values of the Integral of Absolute Error (IAE) of the controlled variables, ω_g and P_g , and the control effort of the pitch, TV_{pitch} , to achieve the best possible performance.

I. INTRODUCCIÓN

A. Descripción del problema de control

Los aerogeneradores pueden trabajar en cinco diferentes modos de operación según la velocidad del viento. Hay tres regiones de generación de energía, tal y como se muestra en la Fig. 1, y para cada una de ellas existe un objetivo de control diferente [1].

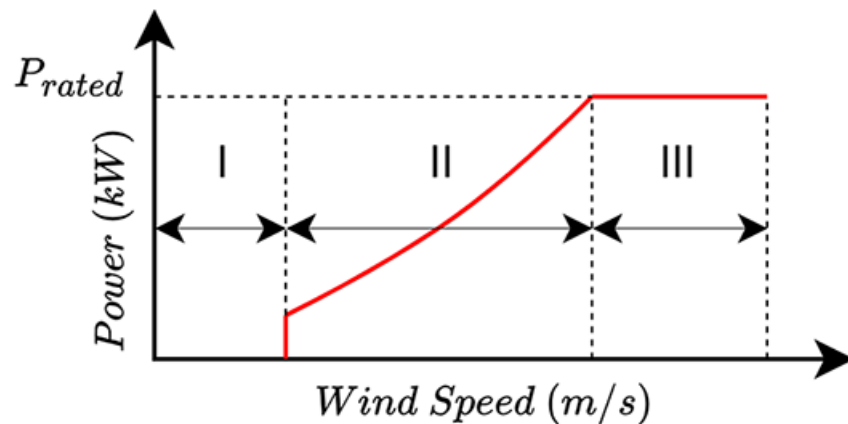


Fig. 1. Regiones de operación de un aerogenerador [2].

El objetivo principal es diseñar un controlador para la región III (región nominal o a plena carga) del aerogenerador, en donde lo primordial es reducir el efecto de la alta velocidad del viento incidente para evitar daños en el sistema. Para esto, es necesario mantener la potencia del generador en su valor nominal. Esto mediante controladores que actúan sobre el ángulo de paso de las palas para modificar la aerodinámica del aerogenerador, limitando así la energía que se extrae del viento.

El controlador propuesto debe mantener la potencia generada (P_g) en su valor nominal, operando en el modo de control regulatorio, dado que en la región de trabajo únicamente dependerá de la velocidad angular (ω_g) según la Ecuación (1), controlar dicho valor equivale a controlar la potencia generada.

$$P_g = T_{g\ rated} \cdot \omega_g \tag{1}$$

II. SISTEMA DE CONTROL

En esta sección, se presenta una descripción del esquema de control para el proceso del aerogenerador. El esquema planteado inicialmente, se muestra en la Fig. 2 ;

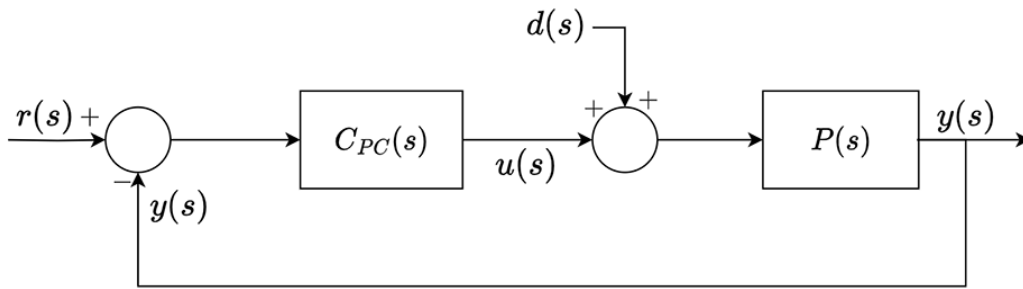


Fig. 2. Sistema de control aerogenerador.

Las variables descritas en la Fig. 2 son:

- $y(s)$ es la variable controlada de proceso $\omega_g (rpm)$.
- $r(s)$ es la velocidad angular de referencia.
- $u(s)$ es la señal de control el *pitch* en grados.
- $d(s)$ es la perturbación del proceso, el viento incidente V_x y V_y en m/s .

en donde $P(s)$ es el proceso controlado del aerogenerador y $C_{PC}(s)$ se refiere al controlador propuesto a diseñar. El ajuste de los parámetros del controlador, para garantizar un buen desempeño, se aborda como un problema de optimización de una función de costo J_o , que se define a partir de la Ecuación 2.

$$J_o = w_1 IAE_{\omega_g} + w_2 IAE_{P_g} + w_3 TV_{pitch} \tag{2}$$

En donde w_i son pesos fijos que suman la unidad y los índices de desempeño se definen mediante las siguientes ecuaciones:

$$IAE_{\omega_g} = \int |r(t) - y(t)| dt \tag{3}$$

$$IAE_{P_g} = \int |T_{g-rated} r(t) - T_{g-rated} Y(t)| dt \tag{4}$$

$$TV_{pitch} = \int \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt \quad (5)$$

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR

El diseño del controlador propuesto $C_{pc}(s)$, se ha realizado partiendo el procedimiento en cuatro partes. Primeramente, se identifica un modelo de primer orden más tiempo muerto utilizando el *método de tres puntos 123c* de [3]. El propósito del modelo es ayudar a identificar los parámetros de un controlador PI estándar inicial, determinado mediante el método de control por modelo interno (IMC), este controlador se ajustará a partir de una optimización para obtener una mejoría en los parámetros, para proceder a implementar un mecanismo anti-windup que evita la saturación de la señal de control a causa del *windup* de la acción integral. Finalmente, los parámetros del controlador se ajustarán buscando su valor óptimo a base de una optimización buscando minimizar el índice J_o procurando el mejor desempeño para el sistema de control.

A. Identificación del modelo

Para obtener el modelo del proceso del aerogenerador, es necesario considerar únicamente la dinámica de la respuesta que se tiene en la variable controlada (ω_g), ante un cambio en la señal de control (*pitch*). Para esto, las perturbaciones del sistema se apagan (V_x y V_y viento incidente), y se obtiene una curva de reacción para aplicar el método de [3]. El modelo identificado se muestra en la Ecuación (6).

$$P_{\omega_g}(s) = \frac{-0,553e^{-0,771s}}{3,158s + 1} \quad (6)$$

El modelo identificado es utilizado a lo largo del diseño del controlador para obtener los parámetros iniciales del controlador PI utilizando el método IMC, realizar un ajuste a los valores iniciales del controlador a base de una optimización y finalmente para efectuar una modificación final de los parámetros del controlador propuesto con el mecanismo anti-windup, optimizando para minimizar J_o garantizando un buen desempeño del sistema.

B. Controlador Inicial IMC

A partir del modelo de primer orden más tiempo muerto identificado, se puede diseñar un controlador inicial a partir del método IMC descrito en [4]. La expresión de dicho controlador PI se indica según la Ecuación (7).

$$C_{IMC}(s) = \frac{T}{K(T_f + L)} \left(1 + \frac{1}{Ts} \right) \quad (7)$$

Para este controlador basado en IMC, se toman los valores de K , L y T del modelo de primer orden identificado. La constante T_f se toma como un valor unitario buscando una respuesta rápida que no vuelva inestable el sistema. Los parámetros del controlador inicial PI y el índice J_o del mismo se muestran en el CUADRO I.

CUADRO I.
PARÁMETROS DEL CONTROLADOR $C_{IMC}(S)$ INICIAL.

Parámetros	k_p	T_i	J_o
$C_{IMC}(S)$	3.2245	3.1580	1.8913

C. Ajuste del Controlador Inicial

Un ajuste del primer controlador diseñado a partir del método IMC, cuyos parámetros se encuentran en la Tabla 1, se realiza buscando los mejores valores para el controlador PI diseñado. En este caso, el ajuste inicial se efectúa a partir del modelo de primer orden identificado realizando una optimización basándose en el índice J_o descrito en (2). Los parámetros del controlador inicial optimizado se encuentran indicados en el CUADRO II.

CUADRO II.
PARÁMETROS DEL CONTROLADOR $C_{IMC}(S)$ OPTIMIZADO.

Parámetros	k_p	T_i	J_o
$C_{IMC}(S)$	1.5000	1.1382	0.777

D. Diseño Mecanismo Anti-WindUp

Una vez lograda una mejoría en el índice de desempeño J_o para el controlador PI inicial, se busca implementar un mecanismo anti-windup que evite que la señal de control alcance los máximos físicos del cambio en el *pitch* y por consecuencia del windup de la acción integradora el actuador del sistema se sature.

El mecanismo anti-windup, añade un parámetro extra al controlador T_i , el cual es el responsable de descargar la acción integradora, según se indica en [5] es posible limitar el valor del parámetro a $T_i = 10T_i$ ya que para valores mayores no hay un aporte al sistema. El valor inicial de la constante del anti-windup se indica en la Ecuación (8), basándose en lo explicado en [5] y buscando que el sistema posea una rápida descarga de la acción integral en casos de saturación, adicionalmente se fija el valor de la saturación en 1.5 para prevenir los cambios bruscos en el valor del *pitch*.

$$T_i - 0,05 T_i \quad (8)$$

E. Optimización del Controlador Propuesto

Una vez añadido el mecanismo anti-windup al controlador diseñado, se trabaja a partir del sistema de control mostrado en Fig. 3; en este caso $C_{AW}(s) = 1/T_i$ que indica el controlador anti-windup, y las señales $u'(s)$ es la señal de control saturada y $u(s)$ la señal de control limpia para el actuador del proceso del aerogenerador.

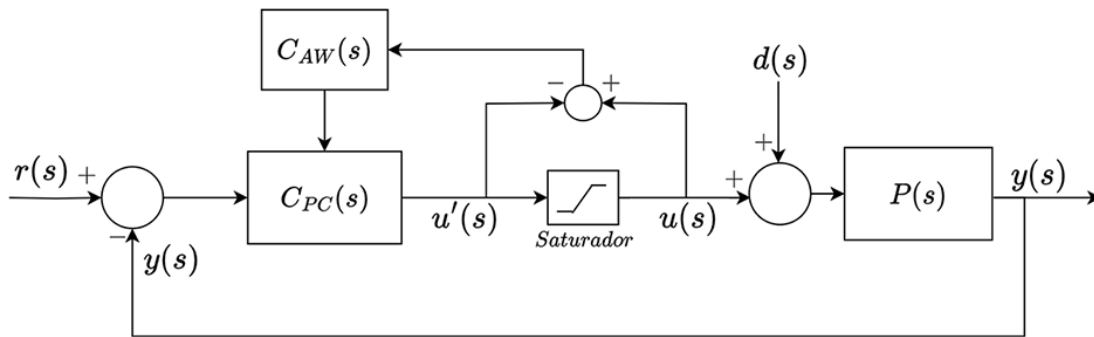


Fig. 3. Sistema de control con mecanismo Anti-Windup implementado.

Mediante el uso de la función *fminmax* en MATLAB, se busca optimizar el controlador utilizando como punto inicial el controlador IMC optimizado, primero se procede a obtener el valor óptimo de T_i , optimizando únicamente este parámetro obteniendo que el valor óptimo es el indicado en la Ecuación (9).

$$T_i = \frac{T_i}{4} = 0,7895s \quad (9)$$

Fijando este valor la optimización se realiza en base a minimizar el índice que indica la Ecuación (2), que se calcula a partir del error integral y esfuerzo de control del modelo identificado del proceso, utilizando los siguientes valores para los pesos $w_1 = w_2 = 0,475$ y $w_3 = 0,05$. Con cada iteración de la optimización se busca mejorar el desempeño del controlador en el modo de control regulatorio.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

La manera en la que se procedió en la optimización, facilitó la mejora del desempeño una vez se agregó al esquema de control el mecanismo anti-windup, posterior a esto, se procede a fijar el valor de la constante T_i en su valor óptimo encontrado y buscar por medio de optimizaciones los valores de K_p y T_i más adecuados para reducir el índice Jo. Los parámetros de tres de los controladores obtenidos en las optimizaciones y el controlador propuesto $C_{PC}(s)$, se encuentran indicados en el CUADRO III.

Se puede observar que manteniendo una constante del mecanismo anti-windup en un valor fijo, se pueden obtener parámetros de controladores PI similares pero que mejoran en desempeño, esto se debe a que la función *fminmax* busca el conjunto de parámetros que mejor se ajusten a las

condiciones impuestas en el problema de optimización, en este caso se refiere a la minimización del índice J_o .

CUADRO III.
PARÁMETROS DE LOS CONTROLADORES OPTIMIZADOS.

Parámetros	K_p	T_i	T_d
$C_1(s)$	1.9965	1.3033	0.7895
$C_2(s)$	1.8150	1.2347	0.7895
$C_3(s)$	1.5000	1.1382	0.7895
$C_{pC}(s)$	1.6500	1.1681	0.7895

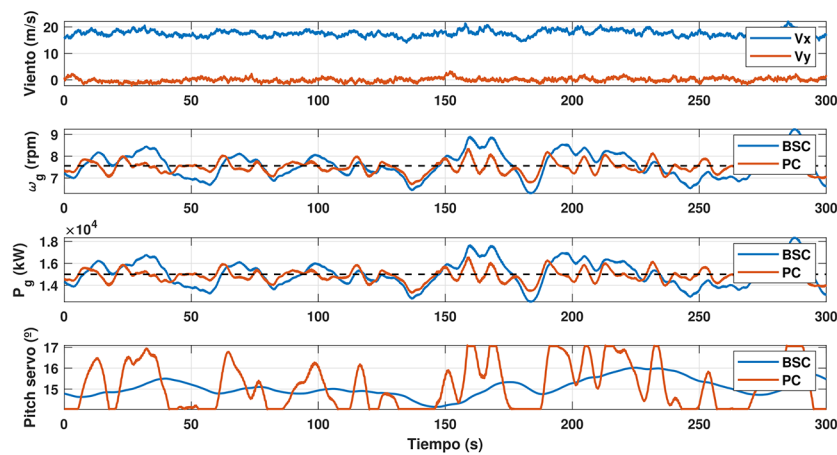


Fig. 4. Respuesta del sistema implementando el controlador propuesto $C_{pC}(s)$ optimizado.

En la Fig. 4, se puede analizar las señales de la respuesta del sistema con el controlador propuesto implementado, tal y como se espera, se tiene un comportamiento en modo de control regulatorio, ya que el sistema es capaz de rechazar las perturbaciones del viento incidente al generador, buscando mantener tanto su velocidad angular como la potencia generada en su valor nominal.

A pesar de que la señal de control gráficamente se observa que realiza un esfuerzo de control de magnitud alta, a partir de la Tabla IV se puede analizar que el valor para este parámetro es relativamente bajo, gracias a la acción del mecanismo anti-windup que previene la saturación de la acción integradora y apaga la señal de control en los intervalos de tiempo en donde el cambio en el *pitch* sobrepasa la saturación máxima definida.

Finalmente, en el CUADRO IV, se muestran los índices de desempeño de los controladores cuyos parámetros se resumen en el CUADRO III, esto con el fin de poder comparar los índices de desempeño que se obtuvieron en las simulaciones del proceso. Se puede analizar que el orden de los controladores fue debido al menor índice J_o obtenido, en este caso, el controlador propuesto $C_{pC}(s)$ es el que mejor desempeño obtiene frente a los otros ya que posee un $J_o = 0,6414$, que es el

menor de los controladores optimizados. A pesar de que el esfuerzo del $pitch TV_{pitch}$ no es el más bajo de los comparados, los índices IAE_{og} y $IAEP_g$ que corresponden al error integral, son valores pequeños por lo cuál compensan la ponderación para obtener un índice total más bajo respecto a los otros mostrados en el CUADRO.

CUADRO IV.
ÍNDICES DE LOS CONTROLADORES OPTIMIZADOS.

Índices	IAE_{og}	$IAEP_g$	TV_{pitch}	J_o
$C_1(s)$	0.4458	0.4458	10.9607	0.6561
$C_2(s)$	0.4559	0.4559	9.9398	0.6456
$C_3(s)$	0.4784	0.4784	8.6592	0.6420
$C_{pC}(s)$	0.4663	0.4663	9.2222	0.6414

Lo cual indica que en el sistema de control del aerogenerador, existe un compromiso entre el esfuerzo de control y el error integral de la variable controlada, esto ya que es necesario un balance para poder obtener un índice de desempeño bajo y que el sistema funcione adecuadamente.

CONCLUSIONES

En este trabajo mediante la identificación de un modelo que pudiera aproximar la dinámica del proceso que representa al aerogenerador, se logra diseñar un controlador PI estándar inicial mediante el método IMC, para proceder a ajustar estos valores mediante optimización, buscando un mejor valor para J_o .

Posteriormente, con la implementación de un mecanismo anti-windup es posible obtener un controlador propuesto $C_{pC}(s)$, que sea capaz de lograr un buen desempeño en el modo de control regulatorio, esto con el fin de mantener la potencia generada del aerogenerador en su valor nominal a partir del control de la velocidad angular del mismo, manipulando el valor del $pitch$.

De esta forma se finaliza proponiendo el diseño de un controlador $C_{pC}(s)$ que pertenece a la familia PID, y es capaz de controlar el proceso del aerogenerador de alta potencia y obtener un buen desempeño, implementando técnicas de control avanzado como lo es el control por modelo interno (IMC) y la implementación del mecanismo Anti-WindUp y optimizando para minimizar una función objetivo J_o formada a partir de los índices de desempeño del sistema.

REFERENCIAS

- [1] M. Lara y M. Ruz, *Concurso en Ingeniería de Control 2023*. España: Comité Español de Automática, 2023.
- [2] R. Jaramillo, R. Cabrera y F. López, *Sistema de control para una turbina eólica*. México: Instituto Tecnológico de Celaya, 2014.

- [3] V. M. Alfaro, *Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso*. Ciencia y Tecnología, 24(2):197–216., 2006.
- [4] V. M. Alfaro, ed., *Sistemas de control proporcional, integral y derivativo: Algoritmos, análisis y ajuste*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2018.
- [5] H. Markaroglu, M. Guzelkaya, I. Eksin y E. Yesil, «Tracking Time Adjustment In Back Calculation Anti- Windup Scheme, » mayo de 2006. DOI: 10.7148/2006-0613.

Gestión ambiental de baterías de VEs tras concluir su vida útil en Costa Rica

End-of-life Environmental Management for EV Batteries in Costa Rica

Brenda Yarid Núñez Gutiérrez

Estudiante, Escuela de Ingeniería Química, UCR

email: brenda.nunez@ucr.ac.cr

Dra. Cindy Torres Quirós

Investigadora y Docente, Escuela de Ingeniería Química, UCR

email: cindy.torres@ucr.ac.cr

Palabras clave:

BATERÍAS ION LITIO, electromovilidad, modelo de gestión, trazabilidad, vehículos eléctricos.

Keywords:

LITHIUM-ION BATTERIES, electromobility, management model, traceability, electric vehicles.

RESUMEN

La electromovilidad es una estrategia clave para la disminución de gases de efecto invernadero, pero también plantea desafíos en la gestión adecuada de las baterías de ion-litio. Estas son costosas de fabricar y reciclar, y la creciente demanda mundial incrementa la presión sobre la cadena de suministro. No obstante, esta situación también brinda oportunidades para el aprovechamiento de baterías en aplicaciones de segundo uso o reciclaje. Para abordar su manejo, se propone un modelo de gestión nacional para la trazabilidad de las baterías de vehículos eléctricos (VEs) en Costa Rica. Este trabajo se basa en la revisión de estudios y regulaciones a nivel mundial con la meta de identificar vacíos o vulnerabilidades en el contexto nacional. Se concluye que alianzas público-privadas han resultado en la creación de estrategias claras de gestión. Se recomienda la elaboración de guías para la gestión de baterías de ion litio usadas en Costa Rica, que aborden los puntos de vulnerabilidad identificados. Además, el éxito de iniciativas de gestión público-privadas depende de estrategias efectivas de difusión de información y de la coordinación de los actores involucrados. Satisfactoriamente, se desarrolló una propuesta de modelo de gestión nacional para la trazabilidad de baterías ion litio.

ABSTRACT

Electromobility is a key strategy for reducing greenhouse gases, but it also poses challenges in the proper management of lithium-ion batteries. These are expensive to make and recycle, and growing global demand puts pressure on the supply chain. However, this situation also provides opportunities for the use of batteries in second-life applications or recycling. To address its management, a national management model for the traceability of electric vehicle (EVs) batteries in Costa Rica is proposed. This work is based

on the review of studies and regulations worldwide, with the goal of identifying gaps or vulnerabilities in the national context. It is concluded that public-private alliances have resulted in the creation of clear management strategies. It is recommended the preparation of guides for the management of used lithium-ion batteries in Costa Rica, which address the identified points of vulnerability. In addition, the success of public-private management initiatives depends on effective information dissemination strategies and coordination of stakeholders. Satisfactorily, a proposal for a national management model for the traceability of lithium-ion batteries was developed.

I. INTRODUCCIÓN

La movilidad eléctrica es una de las estrategias clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero Costa Rica, un país que se ha propuesto ser carbono neutral para el año 2050. Sin embargo, el despliegue de los vehículos eléctricos también implica múltiples desafíos, entre ellos, la gestión adecuada de las baterías de ion-litio que contienen estos vehículos cuando llegan al final de su vida útil. En el año 2017, la Asamblea Legislativa aprobó la Ley de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico, un esfuerzo para la descarbonización del sector transporte [1]. Costa Rica aumentó su cantidad de automóviles eléctricos en circulación en un 67% con la nueva flotilla y las proyecciones e intenciones del gobierno buscan aumentar esta cifra [2].

Las baterías utilizadas en los automóviles eléctricos son las más costosas de fabricar y reciclar [3]. Este reto es exacerbado con la creciente demanda mundial por los metales que las conforman, el aumento exponencial en costos, la poca disponibilidad geográfica de materia prima y arduo y sensible proceso de extracción [4]. Esto expone la realidad del tratamiento de baterías de automóviles eléctricos en países desarrollados en la actualidad. Es una industria naciente, pero de rápido crecimiento, ya que estos desechos se podrían aprovechar en aplicaciones de segundo uso o bien, mediante la extracción de dichos metales, se proveería a fabricantes con una fuente secundaria de materia prima [5].

La generación de desechos de difícil manejo como lo son las baterías ion litio exige la búsqueda de alternativas de tratamiento verdes, que cumplan con los principios de jerarquía de gestión de residuos y de economía circular, para convertir a la industria del reciclaje en un esfuerzo factible, en especial en países como Costa Rica.

Este proyecto tiene como objetivo principal proponer un modelo de gestión nacional para la trazabilidad de baterías de vehículos eléctricos en Costa Rica.

II. MARCO TEÓRICO

A. Baterías: Funcionamiento y componentes

La batería es un dispositivo de conversión directa de energía química a energía eléctrica a través de reacciones de oxidación-reducción, almacenando la energía resultante dentro del mismo dispositivo [6]. A grandes rasgos, la batería está conformada por celdas que, a su vez, consisten en

un electrodo reductor que cede electrones durante la reacción electroquímica, un electrodo oxidante que acepta dichos electrones, un electrolito que funciona como medio de transferencia de especies cargadas entre los electrodos, terminales, separadores y un contenedor [7].

B. Baterías recargables de ion litio: funcionamiento, formato y tipo.

Las baterías de ion litio o Li-ion son baterías recargables de gran densidad energética, cuyas celdas emplean compuestos de almacenaje de litio como materiales para sus electrodos [8]. Durante el proceso de descarga, los iones de litio se transportan desde el ánodo, a través del electrolito y el separador hasta el cátodo, donde ocurre la reducción de los óxidos de metales de transición durante la intercalación del litio en el óxido metálico [9]. Durante la carga, el proceso se revierte.

Entre sus ventajas más destacables se encuentran su larga vida útil (300-1000 ciclos hasta alcanzar el 70-80% de capacidad de carga), amplio rango de temperaturas de operación, baja velocidad de auto descarga, alta eficiencia energética, larga vida bajo almacenamiento, falta de efecto memoria y celdas selladas que no requieren de mantenimiento [10].

III. METODOLOGÍA

Se realizó la revisión bibliográfica exhaustiva de estudios, lineamientos, legislación y reglamentos a nivel mundial relacionados con la gestión de baterías usadas de ion litio, centrándose específicamente en las etapas de recolección y acopio, transporte, diagnóstico y descarga. Tras esta la revisión y la recopilación de los elementos de interés, se ejecutó el análisis de instrumentos normativos en Costa Rica sobre cada etapa bajo estudio, identificando vacíos o brechas que se puedan complementar o cerrar a partir de las experiencias internacionales. A partir del análisis de brechas, se estableció un modelo de gestión nacional para la trazabilidad de las baterías de vehículos eléctricos, así como un plan de gestión de baterías recargables para su segundo uso, adecuado para su aplicación en Costa Rica.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Recolección

Parte de la visión de la Unión Europea de combatir el cambio climático incluye el establecimiento de objetivos de recolección agresivos, la aplicación marcos regulatorios más completos sobre la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y establecer esquemas de recolección de baterías recargables al final de su vida útil que faciliten la participación del público [11].

Con respecto a lineamientos específicos de recolección, alianzas público-privadas entre el gobierno neozelandés y *Eunomia Consulting Group* ha resultado en recomendaciones sobre el establecimiento y registro de puntos de recolección, características que las instalaciones de almacenamiento temporal en centro de recolección deben tener y medidas de seguridad para

salvaguardar la integridad de los trabajadores y del público en general [12]. Además, incluye recomendaciones de embalaje de las baterías en sí, para minimizar potenciales riesgos de incendio, explosión, liberación de gases o líquidos nocivos o electrocución [12].

En cambio, en Canadá, el Departamento de Medio Ambiente y Lucha contra el Cambio Climático (MELCC) se inscribe a la política REP donde las empresas que comercializan baterías de ion litio y dispositivos que las contienen deben gestionarlos al final de su vida útil. Estas deben establecer un programa accesible y gratuito para recuperar y reciclar sus productos a través de un sistema de recolección que incluye puntos de entrega, eventos de recolección y programas de sensibilización y educación. Las empresas tienen la opción de establecer sus propios programas de recuperación y reciclaje o unirse a una organización de gestión reconocida (RMO) como *Call2Recycle* [13].

Con respecto a Costa Rica, baterías de ion litio se clasifican como residuos de manejo especial basados en la “Ley para la Gestión Integral de Residuos”. Dicha ley define el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor de Residuos de Manejo Especial. Esta clasificación somete a productores, comerciantes e importadores de dispositivos como baterías de ion litio a cumplir con al menos una medida descrita en el Artículo 47 para mitigar o compensar su impacto ambiental [14]. No obstante, estas obligaciones no garantizan el establecimiento de un programa de recuperación ni la alianza con otra entidad para el instituir centros de recolección. En conjunto con REP, el Ministerio de Salud ha formalizado estrategias de recolección con un mapa puntos de recolección en su página web [15] y campañas nacionales de recolección de aparatos eléctricos y electrónicos [16]. El éxito de estas estrategias, no obstante, es completamente dependiente de la difusión de la información al público general.

B. Transporte

Con respecto a las recomendaciones de transporte, las Naciones Unidas propone instrucciones de embalaje/envasado para baterías de ion litio (UN 3480 y UN 3481) que se transporten con el propósito de eliminación o reciclaje, lineamientos de etiquetado y clasificación y medidas de seguridad para proteger al transportista o cualquier trabajador que entre en contacto con los paquetes [17]. Países como Nueva Zelanda y Canadá han incorporado estas recomendaciones dentro de sus leyes de transporte terrestre y marítimo, excluyendo el transporte aéreo por aspectos de seguridad. Además, ambos países han elaborado guías de transporte que incluyen las instrucciones de embalaje a mayor detalle, listas de implementos de seguridad y plantillas de documentación obligatorias que deben ser llenadas, firmadas y entregadas por todos los actores involucrados en el tránsito [12].

En el caso de Costa Rica, el transporte de baterías de ion litio se normaliza mediante el “Reglamento para el Transporte Terrestre de Productos Peligrosos”. Este reglamento las condiciones de transporte, específicamente los implementos que los vehículos involucrados deben portar para afrontar cualquier emergencia, incluyendo aquellas ocasionadas directamente por el cargamento [18]. Al mismo tiempo, se acata el “Reglamento técnico RTCR 305:1998 Transporte terrestre de productos peligrosos, Señalización de las unidades de transporte terrestre de materiales y productos químicos”, el cual establece requerimientos mínimos de etiquetado en las unidades de transporte dentro

del país, con el fin de comunicar efectivamente la naturaleza de su cargamento a otros conductores y autoridades [19]. Los reglamentos mencionados previamente no incluyen lineamientos sobre el embalaje de los cargamentos en sí, creando una vulnerabilidad en la gestión de las baterías si no se implementan las recomendaciones de envase de las Naciones Unidas para minimizar daños por golpes y vibraciones características del tránsito de bienes.

C. Almacenamiento

A diferencia del transporte de mercancías peligrosas, las Naciones Unidas no ha publicado recomendaciones sobre el almacenamiento de baterías de ion litio con el propósito de desecho o reciclaje. Sin embargo, países como Nueva Zelanda, Austria y Alemania incorporan instrucciones de embalaje/envasado empleadas en las *Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas*, en conjunto con reglas de segregación y separación. En general, se marcha a partir de la suposición de que las baterías, independientemente de su estado, se encuentran completamente cargadas y presentan un peligro inminente [12]. Este riesgo implica una estricta segregación de baterías según su química, el etiquetado claro y adecuado de los paquetes y áreas de almacenamiento, el distanciamiento de fuentes de calor, combustibles y sustancias incompatibles y la implementación de sistemas de vigilancia para la prevención y sistemas de extinción para la mitigación de emergencias asociadas a las baterías [12]

Al igual que estas naciones, Costa Rica también carece de normativas o recomendaciones específicas para el almacenamiento de baterías de ion litio usadas. Bomberos de Costa Rica no posee lineamientos para el almacenamiento de los dispositivos y la adaptación de las instalaciones, pero cuenta con una guía para la elaboración de planes básicos de protección contra incendios [20]. Esta guía podría ser base para la elaboración de lineamientos, enriquecidos con experiencias internacionales.

D. Diagnóstico

El diagnóstico es la etapa clave en la que se determina el destino de una batería de ion litio tras su primera vida útil: reciclaje o reutilización. Entre las aplicaciones para segunda vida útil, se encuentra su uso en arbitraje de energía, reducción de picos, servicios de red, integración de energías renovables, soporte para estaciones de carga de vehículos eléctricos, reserva de capacidad y movilidad eléctrica personal y pequeños dispositivos electrónicos [21]. La reutilización se enfoca en baterías de vehículos eléctricos por lo que, en 1996, el Consorcio de Baterías Avanzadas de los Estados Unidos introdujo un criterio de retiro que se sigue empleando en la actualidad: un *pack* de baterías tiene que retirarse cuando su estado de salud (SOH) cae al 80 % [22]. Es importante tomar en cuenta que dispositivos críticos como dispositivos médicos y militares se reemplazan basándose en un conteo de ciclos o un sello de fecha, sin requerir evaluación, por lo que fabricantes pueden garantizar el funcionamiento adecuado con un gran margen de seguridad [23].

El estado de salud (SOH) no se puede medir directamente, sólo se puede estimar con varios grados de precisión en función de los indicadores de envejecimiento y el método de medición/estimación empleada. Al probar una batería, se deben evaluar tres indicadores de SOH: capacidad,

resistencia interna o su capacidad de suministrar corriente y autodescarga, basándose en los estándares de seguridad ANSI/CAN/UL 1974 para la evaluación de baterías para reutilización [23], [24].

Tras el diagnóstico de la batería, analizando las condiciones de degradación y señales de envejecimiento, se realiza un estudio de viabilidad técnica para diferentes aplicaciones y configuraciones de segunda vida útil [21]. Por último, la evaluación económica es el último punto de prueba, analizando las posibles aplicaciones y métodos de implementación que más se ajusten a presupuesto de desarrollo disponible [21].

Compañías como DEKRA y *National Instruments* han desarrollado dispositivos de tecnología propietaria que permiten la obtención del SOH de un *pack* de baterías en unas cuantas horas o minutos, con márgenes de error muy bajos en comparación con procesos convencionales [25]. En el caso de DEKRA, los algoritmos y procesos propietarios de sus productos de diagnóstico fueron posibles en colaboración con la Universidad de Aachen [25].

E. Descarga

Para minimizar los riesgos durante la trituración de las baterías, un procesamiento previo al reciclaje), se recomienda la descarga de estas. Universalmente, la literatura menciona la descarga electroquímica, un método que involucra sumergir las baterías en una solución salina acuosa que actúa como una resistencia primitiva o un cortocircuito controlado para descargarla [26]. En este método, la corrosión severa en los polos aumenta los tiempos de descarga, puede causar la fuga de los componentes internos y dificulta la lectura precisa del voltaje [27]

Otro método de descarga involucra sumergir las baterías en nitrógeno líquido y/o realizar la trituración en una atmósfera inerte o al vacío. Dentro de las desventajas de este proceso, se encuentran los altos costos financieros y energéticos y la limitada cantidad de volumen de procesamiento [11], [28].

Un método más convencional es descarga mediante la conexión con resistores, un método típicamente utilizado en baterías y celdas de dispositivos electrónicos, aunque es posible aplicarlo en packs de baterías más grandes. Por la falta de estandarización de tamaños y geometrías de las celdas, la concesión manual de resistores no es una opción económicamente viable a nivel industrial [29].

La falta de consenso sobre el método más apropiado, la cantidad de variables a considerar si se desea escalar el proceso y el vacío regulatorio a nivel nacional e internacional, deja el reto, responsabilidad y riesgo de optimizar esta etapa a manos de los gestores e investigaciones académicas.

F. Propuesta de modelo de gestión nacional

Un aspecto de gran importancia en la consolidación de una economía circular para baterías de ion litio es la trazabilidad de estos dispositivos y sus elementos. En la actualidad, la trazabilidad de baterías se encuentra limitada a las declaraciones aduaneras de los productos importados y a las declaraciones de residuos, pero la implementación de tecnología *blockchain* se ha apoderado de la conversación mundial en los esfuerzos por brindar trazabilidad a la cadena de suministro.

A pesar de sus desventajas como latencia, barreras de usabilidad y falta de regulación, Nueva Zelanda y la Unión Europea, en colaboración con empresas privadas, están desarrollando programas de trazabilidad con tecnología *blockchain*. Nueva Zelanda y Everledger tienen el *Everledger Battery Passport* [30], la Unión Europea está desarrollando el *Circular System for Assessing Rare Earth Sustainability* o CSyARES [31] y Alemania, SYSTEMIQ GmbH, BMW, Audi, Umicore y BASF trabajan un precursor a un pasaporte de baterías [32].

En la Fig. 1, se presenta una propuesta de modelo de gestión nacional que asegure la trazabilidad de baterías de ion litio, con todos los actores de interés unidos por flujos de información, auditorías, educación, dinero y baterías.

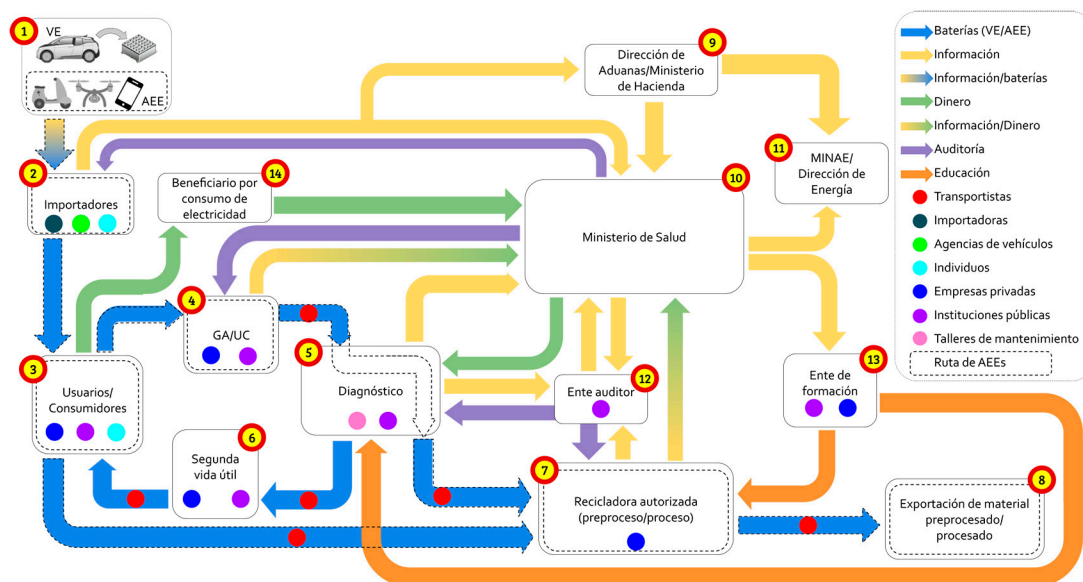


Fig. 1. Modelo de gestión nacional para la trazabilidad de baterías ion litio.

CONCLUSIONES

- Alianzas público-privadas en países como Nueva Zelanda y Alemania han resultado en la creación de lineamientos, reglamentos y estrategias en todas las etapas de gestión, promocionando una economía circular.
- Se recomienda la elaboración de guías o lineamientos para la gestión de baterías de ion litio usadas en Costa Rica en todas sus etapas, que aborden los puntos de vulnerabilidad identificados.
- El éxito de iniciativas de gestión público-privadas depende de estrategias efectivas de difusión de la información al público y de la coordinación de los actores involucrados en la alianza.
- Satisfactoriamente, se desarrolló una propuesta de modelo de gestión nacional para la trazabilidad de baterías ion litio.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al Instituto ECAC y al MINAE por sus comentarios constructivos para la elaboración de la propuesta de gestión.

REFERENCIAS

- [1] E. Arrieta, “Grupo ICE presenta flotilla de 100 autos eléctricos”, *La República*, el 3 de diciembre de 2018. <https://www.larepublica.net/noticia/grupo-ice-presenta-flotilla-de-100-autos-electricos> (consultado el 13 de agosto de 2020).
- [2] J. F. Lara Salas, “ICE presenta flotilla de carros eléctricos valorada en \$3,5 millones - La Nación”, *La Nación*, el 3 de diciembre de 2018. Consultado: el 13 de agosto de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.nacion.com/el-pais/infraestructura/ice-presenta-flotilla-de-carros-electricos/NQADBQUNPNGHRCEAFVVUWLXG5A/story/>
- [3] J. Wu, A. MacKenzie, y N. Sharma, “Recycling lithium-ion batteries: Adding value with multiple lives”, *Green Chemistry*, vol. 22, núm. 7, pp. 2244–2254, abr. 2020, doi: 10.1039/d0gc00269k.
- [4] M. Pagliaro y F. Meneguzzo, “Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight”, *Heliyon*, vol. 5, núm. 6. Elsevier Ltd, el 1 de junio de 2019. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01866.
- [5] G. Harper et al., “Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles”, *Nature*, vol. 575, núm. 7781. Nature Publishing Group, pp. 75–86, el 7 de noviembre de 2019. doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- [6] J. Warner, *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design-Chemistry, Components, Types and Terminology*. Waltham: Elsevier, 2015. Consultado: el 16 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/lib/sibdilibro-ebooks/reader.action?docID=2056916>
- [7] K. W. Beard, “BATTERY FUNCTIONING”, en *Linden’s Handbook of Batteries*, 5a ed. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, 2019. Consultado: el 8 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/book/9781260115925/toc-chapter/chapter1/section/section5>
- [8] J. Dahn y G. M. Ehrlich, “SECTION A: LITHIUM-ION BATTERIES”, en *Linden’s Handbook of Batteries*, 5a ed. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education, 2019. Consultado: el 8 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/book/9781260115925/toc-chapter/chapter17/section/section6>
- [9] S. (Professor of E. Petrovic, P. Kurzweil, y J. Garche, “Lithium Batteries”, en *Electrochemical Energy Storage: Batteries, Fuel Cells, and Hydrogen Technologies*, 1a ed. McGraw-Hill Education, 2022, p. 304. Consultado: el 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/content/book/9781260012002/chapter/chapter6>
- [10] M. Toll, *DIY Lithium Batteries How to Build Your Own Battery Packs Written by Micah Toll*. 2017.
- [11] J. Neumann et al., “Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling”, *Adv Energy Mater*, vol. 12, núm. 17, may 2022, doi: 10.1002/AENM.202102917.
- [12] H. Blumhardt, “Guidelines for the Safe Handling, Transportation, Collection, and Storage of Large Used Batteries”, Auckland, 2021. Consultado: el 16 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://big.org.nz/wp-content/uploads/2021/06/B.I.G.-Safety-Guidelines-FINAL.pdf>

- [13] C. Bandelier, V. Duval, T. Millet, M. Dubois, S. Pillarella, y J. Perreault-Henry, “Study of Extended Producer Responsibility for Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries in Quebec”, Montreal, mar. 2020.
- [14] Asamblea Legislativa, “Ley para la Gestión Integral de Residuos”, *Sistema Costarricense de Información Jurídica*, el 4 de octubre de 2021. https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=68300 (consultado el 23 de mayo de 2023).
- [15] Ministerio de Salud, “Puntos de Recolección de Residuos”, *Observatorio Geográfico en Salud*, 2023. <https://oges.ministeriodesalud.go.cr/visores/catalogo/recoleccion/recoleccion.html> (consultado el 23 de mayo de 2023).
- [16] A. Siles, “Anuncian primera campaña nacional de recolección de basura electrónica”, *La República*, el 1 de marzo de 2023. Consultado: el 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.net/noticia/anuncian-primera-campana-nacional-de-recoleccion-de-basura-electronica>
- [17] Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, “Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas”, Nueva York y Ginebra, 2019. Consultado: el 10 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/unrec/rev21/ST-SG-AC10-1r21s_Vol1_WEB.pdf
- [18] Poder Ejecutivo, “Reglamento para el Transporte Terrestre de Productos Peligrosos”, *Sistema Costarricense de Información Jurídica*, el 11 de enero de 2010. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=40953&nValor3=80233&strTipM=TC (consultado el 23 de mayo de 2023).
- [19] Poder Ejecutivo, “Reglamento técnico: RTCR 305:1998 Transporte terrestre de productos peligrosos. Señalización de las unidades de transporte terrestre de materiales y productos químicos peligrosos”, *Sistema Costarricense de Información Jurídica*, 1998. http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=30431&nValor3=32130&strTipM=TC (consultado el 23 de mayo de 2023).
- [20] Bomberos de Costa Rica, “Reglamentos para la construcción y edificaciones”, *Bomberos de Costa Rica*, 2023. <https://www.bomberos.go.cr/reglamentos-consultas/> (consultado el 23 de mayo de 2023).
- [21] T. Montes, M. Etxandi-Santolaya, J. Eichman, V. J. Ferreira, L. Trilla, y C. Corchero, “Procedure for Assessing the Suitability of Battery Second Life Applications after EV First Life”, *Batteries 2022*, Vol. 8, Page 122, vol. 8, núm. 9, p. 122, sep. 2022, doi: 10.3390/BATTERIES8090122.
- [22] J. Zhu *et al.*, “End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries”, *Cell Rep Phys Sci*, vol. 2, núm. 8, p. 100537, ago. 2021, doi: 10.1016/J.XCRP.2021.100537.
- [23] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World-A Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers*, 4a ed. Cadex Electronics, 2017. Consultado: el 14 de abril de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://batteryuniversity.com/buy-the-book>
- [24] Joint Canada-United States National Standard, “Standard for Safety ANSI/CAN/UL 1974, Evaluation for Repurposing Batteries”, *UL Standards and Engagement*, el 25 de octubre de 2018. https://www.shopulstandards.com/ProductDetail.aspx?productId=UL1974_1_S_20181025&ShowFreeviewModal=1 (consultado el 11 de abril de 2023).
- [25] DEKRA, “The DEKRA Battery Test for Electric Cars”, Berlín, 2022. Consultado: el 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dekra.com/media/ev-battery-testing-fact-sheet-dekra.pdf>
- [26] H. Rouhi, R. Serna-Guerrero, y A. Santasalo-Aarnio, “Electrochemical discharge of Li-ion batteries - A methodology to evaluate the potential of discharge electrolytes without corrosion”, *J Energy Storage*, vol. 55, p. 105734, nov. 2022, doi: 10.1016/J.EST.2022.105734.

- [27] S. Ojanen, M. Lundström, A. Santasalo-Aarnio, y R. Serna-Guerrero, “Challenging the Concept of Electrochemical Discharge Using Salt Solutions for Lithium-Ion Batteries Recycling”, *Waste Management*, vol. 76, pp. 242–249, jun. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.045.
- [28] H. Lee, Y.-T. Kim, y S.-W. Lee, “Optimization of the Electrochemical Discharge of Spent Li-Ion Batteries from Electric Vehicles for Direct Recycling”, *Energies (Basel)*, vol. 16, núm. 6, p. 2759, mar. 2023, doi: 10.3390/EN16062759.
- [29] H. Rouhi, E. Karola, R. Serna-Guerrero, y A. Santasalo-Aarnio, “Voltage behavior in lithium-ion batteries after electrochemical discharge and its implications on the safety of recycling processes”, *J Energy Storage*, vol. 35, p. 102323, mar. 2021, doi: 10.1016/J.EST.2021.102323.
- [30] Everledger, “Battery Passport”, *Everledger*, 2021. <https://everledger.io/industry-solutions/batteries/battery-show/> (consultado el 11 de marzo de 2023).
- [31] S. George, “EU funds new blockchain supply chain tracking scheme for EV battery components - edie”, *Edie Newsroom*, el 9 de febrero de 2022. <https://www.edie.net/eu-funds-new-blockchain-supply-chain-tracking-scheme-for-ev-battery-components/> (consultado el 11 de marzo de 2023).
- [32] J. Spencer Jones, “Battery passport to be developed in Germany”, *Smart Energy International*, el 27 de abril de 2022. <https://www.smart-energy.com/storage/battery-passport-to-be-developed-in-germany/> (consultado el 11 de marzo de 2023).