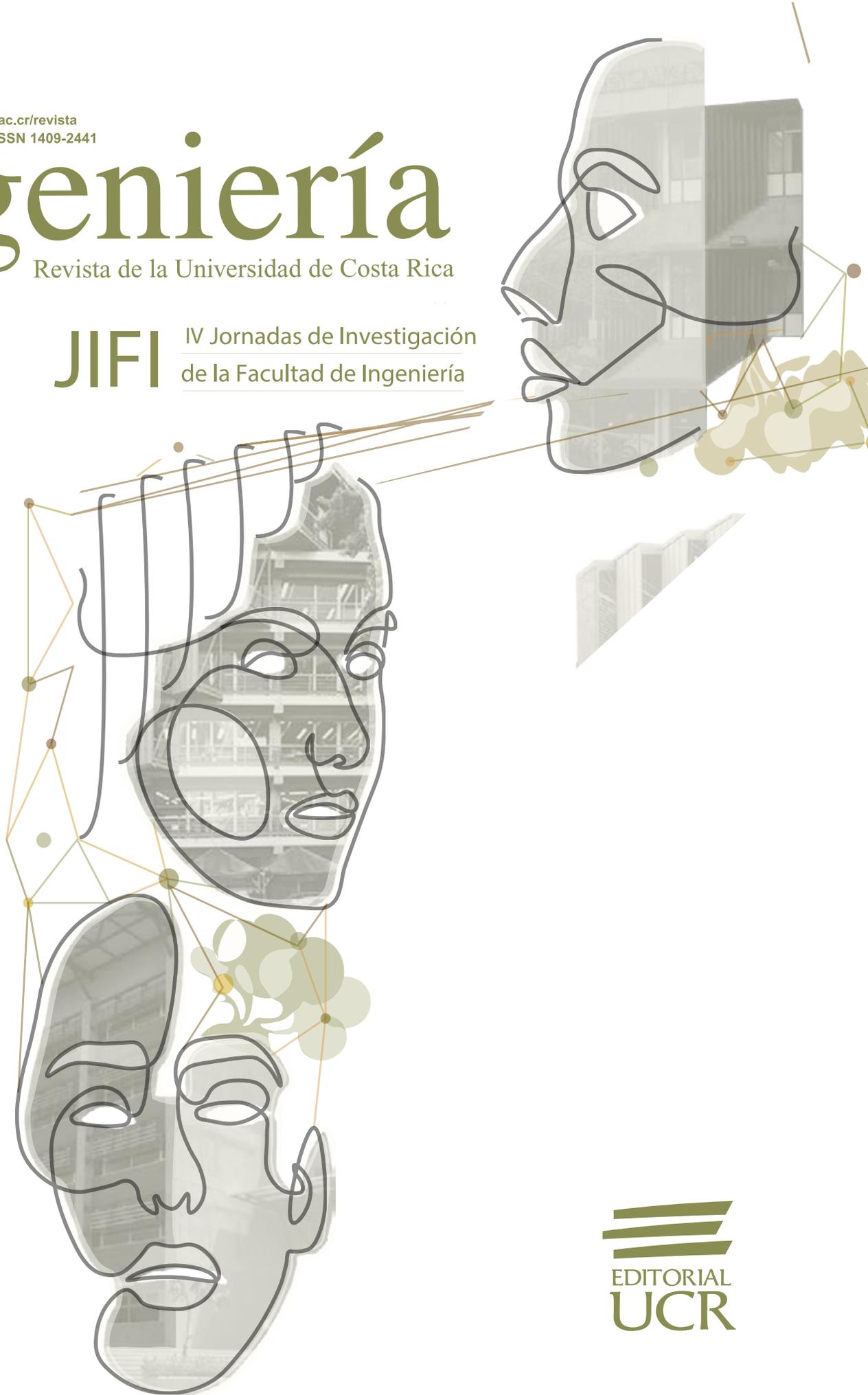


<http://www.inii.ucr.ac.cr/revista>
www.ucr.ac.cr / ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

JIFI IV Jornadas de Investigación
de la Facultad de Ingeniería




EDITORIAL
UCR



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FI Facultad de
Ingeniería

INII Instituto de
Investigaciones
en Ingeniería

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

7 de septiembre de 2022

PERSONAS EDITORAS

Orlando Arrieta-Orozco

Karina Castro-Arce

Víctor Schmidt-Díaz

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

**INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA
EDITORIAL DEL VOLUMEN ESPECIAL**

IEEE:

[1] O. Arrieta-Orozco, K. Castro-Arce, and V. Schmidt-Díaz, Eds., “IV Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2022”. En *Revista de Ingeniería*, Volumen 33 NE3. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2023, pp 1-140. Doi 10.15517/ri.v33iNE3.53667

APA:

Arrieta-Orozco, O., Castro-Arce, K., & Schmidt-Díaz, V. (Eds). (2023). IV Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería 2022. En *Revista de Ingeniería*, Volumen 33 NE3 (pp 1-140). Universidad de Costa Rica. Doi: 10.15517/ri.v33iNE3.53667.

Diseño de portada: Sofia González Araya.

Diagramación: Marcela Quirós Garita y Melissa González Villalobos.

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	VIII
Variable load system for calibration of current sensors used in PMSM motor control	1
Estudio energético de un sistema computacional para un robot humanoide bajo condiciones de estrés	9
Modelado de dos electrodomésticos típicos para ser utilizados por un robot humanoide en una cocina inteligente	19
Navegación autónoma de un robot móvil en un entorno de carreras virtual a escala	31
Mejoramiento de la postura estimada en un robot móvil mediante el Filtro Kalman Unscented	45
Marco analítico para evaluaciones tecno-económicas y ambientales de políticas energéticas para el desarrollo sostenible	55
Investigación en filtrado de señales de habla y su integración con docencia y acción social	63
Algoritmo de clasificación de agentes de contraste exógenos usando imágenes de espectroscopía fotoacústica suave	73
Comparación de un control PID vs. lógica difusa para el manejo de terapia fototérmica no invasiva	81
Sistema en tiempo real Hardware-in-the-Loop para pruebas de control de un páncreas artificial	89
Parques Públicos Regionales, GAM, Costa Rica: patrones de uso y percepciones de personas usuarias	99
Modelo de secado tangencial circulante aplicado a la madera Cupressus lusitánica en una zona volcánica	107
Modelo de un vehículo de péndulo invertido de dos ruedas con tracción dinámica	115
La Impresión 3D con fines didácticos y de rescate histórico del Puente Ferroviario sobre el Río Grande	125
Evaluación de interacciones del robot Pepper en actividades académicas de la Universidad de Costa Rica	133

PRESENTACIÓN

El presente Volumen Especial de la Revista Ingeniería corresponde a la tercera publicación de las memorias de las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería (JIFI).

Las JIFI son una actividad desarrollada de manera conjunta entre la Decanatura de la Facultad y la dirección del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII). Desde el 2019, las JIFI son un espacio donde se exponen resultados y procesos de investigación realizados por el personal docente e investigador, así como por la población estudiantil.

En esta ocasión presentamos el resultado de las 4tas JIFI, cuyo propósito general fue el generar ‘reflexiones acerca de la investigación en Arquitectura, Computación e Ingeniería y sus aportes a la sociedad costarricense’. Las 4tas JIFI se llevaron a cabo el miércoles 7 de setiembre de 2022. Se presentaron quince ponencias sobre proyectos de investigación desarrollados en las escuelas de Ingeniería Civil, Ciencias de la Computación e Informática, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería en Biosistemas, Arquitectura, y el INII. La actividad inició con la charla magistral Trans e inter-disciplinariedad en proyectos, el caso de actualización de la amenaza sísmica de Costa Rica; y cerró con una mesa redonda, que reflexionaba sobre el rol de eventos como Jornadas de Investigación para los distintos institutos o facultades de la Universidad de Costa Rica. Para esta actividad de cierre, se contó con la presencia de la Dra. Isabel Avendaño Flores, decana de la Facultad Ciencias Sociales, el Dr. Álvaro Morales Ramírez, director del CIMAR, el Dr. Víctor Schmidt Díaz, director del INII, y fue moderada por el Dr. Orlando Arrieta Orozco, decano de la Facultad de Ingeniería.

En preparación a las 4tas JIFI, los organizadores desarrollamos un ejercicio de evaluación que nos permitiera conocer la opinión de la comunidad de la Facultad de Ingeniería acerca de este evento anual. La intención es utilizar esta data para mejorar el evento a futuro en aspectos como divulgación, organización, contenidos, y productos. La información brindada por los participantes de la encuesta fue de carácter anónimo. La encuesta estuvo disponible en línea, por medio de los formularios de GoogleDocs, entre el 26 de abril y el 31 de mayo del 2022, y fue distribuida a toda la población estudiantil y docente de la Facultad por medio de correo electrónico directo del Decanato.

Se obtuvieron 446 respuestas a la encuesta de las cuales 73,8 % correspondió a estudiantes y 26,2 % docentes. Un total de cuarenta y cinco personas que han participado como ponentes completaron la encuesta. De esas, treinta y seis personas consideran que la organización fue buena o muy buena. Además, el 95,6 % volvería a participar en las JIFI. Los principales beneficios señalados por personas que han sido ponentes son: el intercambio interdisciplinar, los contactos con otras personas para ampliar sus redes de investigación, la oportunidad de dar a conocer su trabajo, el desarrollar una base para una publicación de artículo, la oportunidad para avanzar en su proyecto de investigación, y el generar ideas para futuros proyectos. Se tuvieron veintitrés respuestas de personas que han participado como público, estas coinciden en que la organización fue muy buena o buena y consideran que los principales beneficios que obtuvieron al participar fueron el intercambio interdisciplinar, los contactos con otras personas para ampliar sus redes de investigación, y el generar ideas para futuros proyectos. También, el 87 % de estas personas estarían interesadas en participar como ponentes en futuras ediciones del evento.

Del total de las 446 personas que respondieron a la encuesta, el 84,8 % nunca había participado ni como ponente ni como público. De estos, la gran mayoría (84,4 %) indican que no conocen información sobre el

evento; otras personas, a pesar de conocer sobre el evento, indican que no consideran que el evento sea de su interés ya que no hacen investigación (14,6 %), y otros señalan no tener tiempo para asistir (15,9 %). La gran mayoría de personas (68,6 %) se estaban enterando de la existencia del evento gracias al correo de invitación para completar la encuesta, mientras otras personas se habían enterado por comunicaciones internas de las Unidades Académicas (38,1 %), por personas conocidas que habían participado en ediciones pasadas y les daban referencia (7,8 %), o bien, por redes sociales (8,1 %). Del total de las personas encuestadas, el 90,8 % estarían dispuestas a participar en futuras ediciones de las JIFI.

La información que arroja la encuesta, así como el evento en sí, indica que hay retos por delante. Primero, es necesario promover mejor la actividad y utilizar más canales de divulgación, especialmente redes sociales. Para esto, es necesario generar contenido frecuente durante todo el año, anticipando el evento, y dando resultados al concluirse. Segundo, y según la opinión de las personas encuestadas, el evento debería ser, de preferencia, anual, lo que implica una organización y coordinación que permita la permanencia de la actividad. Para esto, se requiere una mayor colaboración de las Unidades Académicas que respaldan el evento, esto es no solo en la divulgación, sino también en la organización misma. Tercero, y relacionado con el punto anterior, aumentar la participación de personas investigadoras y docentes de las Unidades Académicas, de manera que todas estén representadas siempre. Para esto, no es solo necesaria la divulgación del evento y la colaboración de las personas directoras de las unidades, sino también el fomentar la inscripción y desarrollo de proyectos de investigación ante la Vicerrectoría.

Igualmente, la información obtenida nos muestra que se han ido cumpliendo objetivos del evento. En cuatro años, se han presentado casi doscientas ponencias sobre proyectos de investigación, cursos, y trabajos finales de graduación que se desarrollan en la Facultad de Ingeniería. La actividad, efectivamente está dando la oportunidad de divulgar investigación. Al mismo tiempo, está creando un espacio de encuentro para que personas investigadoras desarrollen redes fuera de sus círculos tradicionales y fuera de las mismas unidades académicas.

Como organizadores, apuntamos a que se desarrollen más eventos y aumente el interés en ser parte de las JIFI, no solo como público, sino como personas ponentes. Con esto, no solo fomentamos la consolidación del evento, sino que también permitiría continuar con un proceso de mayor calidad y rigurosidad científica. La meta última de las JIFI es ayudar a visibilizar los aportes que se hacen al país y la sociedad costarricense por parte de las Unidades Académicas que conforman la Facultad de Ingeniería.

Editores del volumen especial:

Dr. Orlando Arrita Orozco

Decano

Facultad de Ingeniería

Dra. Karina Castro Arce

Docente e Investigadora

Escuela de Arquitectura e Instituto de Investigaciones en Ingeniería

Dr. Víctor Schmidt Díaz

Director

Instituto de Investigaciones en Ingeniería

ACERCA DE ESTE VOLUMEN ESPECIAL DE LA REVISTA INGENIERÍA

Este Volumen Especial es una memoria del congreso de las IV Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. Las jornadas se desarrollaron de forma virtual y presencial el día 7 de setiembre de 2022. La contribución de resúmenes a este Volumen Especial fue voluntaria por parte de las personas ponentes, por tanto, en este se exponen 15 de 25 ponencias que fueron presentadas durante el evento. Esta memoria compila los resúmenes extendidos de las ponencias abordadas en las IV Jornadas de Investigación.

Descargo revisión de pares

Al tratarse de un Volumen Especial acerca de las Jornadas de Investigación de la Facultad de Ingeniería, es importante aclarar que a las ponencias presentadas no se les aplicó la evaluación de pares académicos que se estipula en la Revista Ingeniería para artículos científicos.

Todos los resúmenes, ya sea en categoría persona profesora/investigadora o estudiante, fueron valorados por el Comité Organizador de las IV Jornadas de Investigación, conformado por representantes de cada una de las unidades académicas que son parte de la Facultad de Ingeniería. La valoración para que las ponencias se consideraran fue, únicamente, una presentación oral de 15 minutos y se utilizaron los siguientes criterios:

1. Presentación de resumen extendido de máximo 1000 palabras.
2. Cumplimiento de formato según el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
3. Tema enmarcado en una de las áreas temáticas definidas para el evento.
4. Originalidad, claridad y precisión en la redacción para su facilidad de comprensión de acuerdo al público multidisciplinar del evento.
5. Síntesis de contenidos: problemática o situación a investigar, métodos, análisis o discusión, resultados.

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 los resúmenes aquí expuestos usando la plataforma *Turnitin*. Si el plagio fue detectado en alguno de los textos, las personas editoras invitadas tomaron la decisión de removerlo de este Volumen Especial. Aún así, debe aclararse que los textos son responsabilidad de cada una de las personas autoras y, como se menciona anteriormente, estos textos no pasaron por los filtros rigurosos establecidos para revistas científicas.

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.

Dra. Karina Castro Arce

Realizó estudios de arquitectura en la Universidad de Costa Rica, y cuenta con una maestría en Gerencia de Proyectos de Desarrollo del Instituto Centroamericano de Administración Pública (ICAP). Egresada de la Maestría en Riesgos, Ciudades y Ordenamiento Territorial con énfasis en Política Pública de la Universidade do Porto, Portugal. Concluyó su investigación doctoral en Planificación Territorial y Medio Ambiente, en la Universidad de Groningen, Países Bajos. Es docente en la Escuela de Arquitectura y en el Posgrado de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de la Escuela de Geografía; además es investigadora en el Instituto de Investigaciones en 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.

Variable load system for calibration of current sensors used in PMSM motor control

Sistema de carga variable para la calibración de sensores de corriente utilizados en el control de motores PMSM

Jordy Cordero Montero

*Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: jordy.cordero@ucr.ac.cr*

Helber Meneses Navarro

*Docente, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: helber.meneses@ucr.ac.cr*

Federico Ruiz Ugalde

*Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, UCR
correo electrónico: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Motor BLAC, accionamiento - sistema de carga, carga mecánica, emulación de par, carga variable.

Keywords:

BLAC motor, drive - load system, mechanical load, torque emulation, variable load.

I. INTRODUCCIÓN

Currently, electrical machines have become indispensable tools for the execution of several tasks that would be complicated to perform only by humans, for instance, the moving of heavy loads as elevators or the transportation of material through the use of conveyor belts. Moreover, these machines can perform tasks continuously without affecting their performance [1]. For these reasons, their study and application has increased in recent times.

In the last two decades many efforts have been made to design systems that are capable of emulating mechanical loads, for instance, in the design of variable speed driver and variable torque driver [2], to emulate elevators with passengers [3] or electric vehicle's mechanical inertia [4], among others. Moreover, due to the extended use of machines and their interaction with humans, it is necessary to create robust and efficient systems that allow carrying out tasks carefully, and for this reason, each system must be tested under different working conditions prior to being added to the system, [5].

The present work shows the implementation of a variable torque generator system for a brushless alternating current (BLAC) motor, to test the behavior of this motor under different load

conditions. Unlike the work presented in [6] that shows a variable load based on a commutation system composed by a dc generator, a chopper and a resistive load, we achieve this property in the system using only a variable resistor that changes the current drawn by the dc motor that works as a generator.

In particular, it is pursued to determine if an offset current adjustment for the current sensors of the motor control system is required under different load conditions. These motors will be used in an omnidirectional mobile platform that will serve as a base to support the upper body of a humanoid robot, as well as give it mobility, and therefore, test the control system under different load conditions is a relevant task.

II. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup designed for testing the BLAC motor with different loads is similar to the presented by [6]. However, instead of using a programmable electronic load, we considered a system composed by a permanent magnet DC motor (it performs as DC generator), pulleys, belt and a test resistor. The main goal is to build a low cost prototype capable of generating different loads for the BLAC motor and test this motor under several conditions, as well as, validate the current sensors performance in the speed control of the BLAC motor.

In Fig. 1, a block diagram that shows the interconnection between the elements mentioned above is presented.

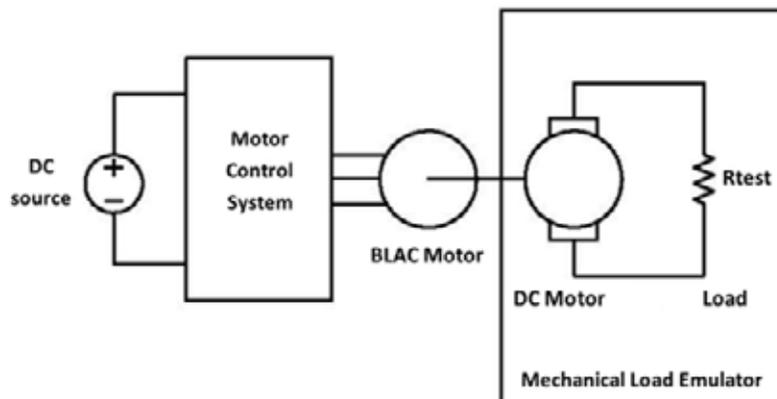


Fig. 1. Experimental setup diagram.

The first step in the experimental setup design was to design a case that allows the coupling between the electric machines through the use of pulleys and a belt. For this purpose, the FreeCad software, which is open source, was used. In Fig. 2a, the case designed is shown.

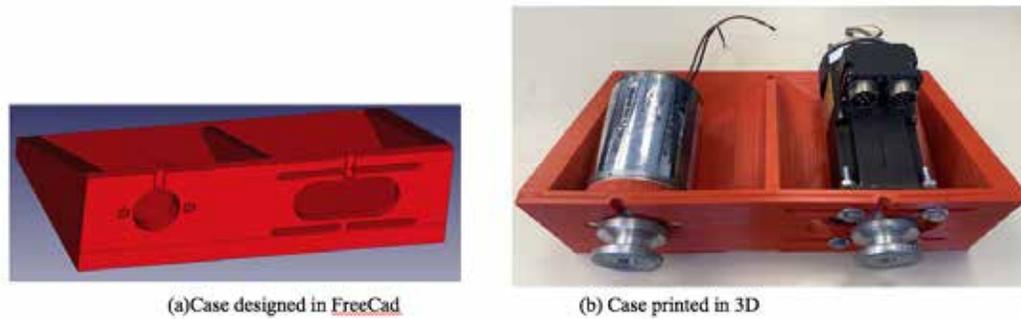


Fig. 2. Mechanical system.

As a second step, the 3D printing of the case was made and it is shown in Fig. 2b. Finally, through the use of pulleys and a belt, the interconnection between the electric machines was made as it can be seen in Fig. 3. This figure, also shows the system employed to develop the tests that allow the validation of the load variable generator system. It is important to clarify that the motor under test (Baldor motor) is on the right and the generator (GS Electric Motor) is on the left side of the Fig. 3.

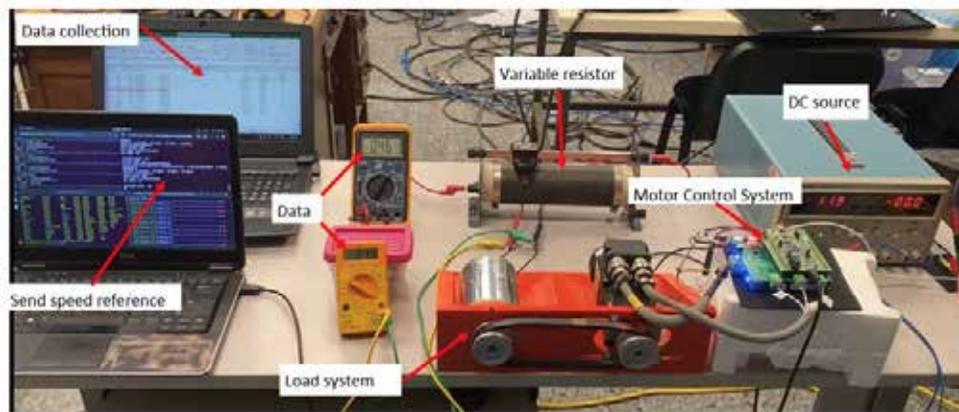


Fig. 3. Variable load mechanical system.

III. EXPERIMENTAL SETUP ANALYSIS AND RESULTS

In this section, an analysis for the estimation of the variable torque produced by the permanent magnet DC motor combined with the variable resistor is presented.

In the proposed experimental setup, the BLAC motor that performs as motor has the characteristics shown in Tab. 1. Its speed control is based on the field oriented control (FOC) algorithm that requires current sensors. Therefore, we used the magneto-resistive current sensors from Allegro Microsystems (ACS70331EESATR- 2P5B3) to implement the control algorithm which runs in a stm32f407 microcontroller.

The motor employed as generator has the characteristics shown in Tab. 2.

CHART I
BLAC MOTOR CHARACTERISTICS.

Baldor Brushless Servo Motor	
SPEC	S1P04W11
Torque converter stall	0.96 NM
Current converter stall	2.60 A RMS
Rated Speed	6000 RPM
Rated Bus Voltage	200 V
Peak Current	10.4 A RMS

CHART II
DC MOTOR CHARACTERISTICS.

GS Electric Motor	
Model	LP101230
Voltage	90 VDC
Speed	6000 RPM
Rotation	CW

A Open circuit test

The first test was made with the purpose of determining the torque constant K_t (GS Electric Motor parameter) which relates the electric torque produced by the permanent magnet DC motor with the armature current. This test was made as open-circuit as it can be seen in Fig. 4

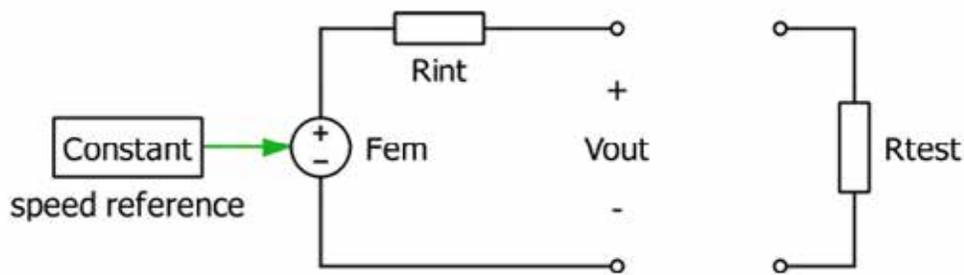


Fig. 4. DC circuit for open circuit test.

The test is based on taking measurements of the voltage generated by the permanent DC motor when its rotor is moving at constant speed. Therefore, the K_t constant can be obtained using equation 1:

$$V_{out} = F_{em} - R_{int}I_a = \omega_m K_t - R_{int}I_a \approx K_t \omega_m, \quad (1)$$

where V_{out} is the voltage in the terminals of the permanent DC motor, R_{int} is the armature Resistance, I_a is the armature current, ω_m is the rotor speed, Fem is the electromotive force (voltage) and K_t is the torque constant.

Five different rotor speeds were considered, and the estimated K_t constant, as well as the mean value of the voltage measurements (V_{out}) and rotor speed measurements (ω_m) are shown in Tab. 3.

CHART III
OPEN CIRCUIT TEST RESULTS

Prueba	Rotor Speed (rad/s)	V_{out} (V)	K_t (Nm/A)
1	10,010	1,318	0,132
2	15,271	1,998	0,131
3	20.400	2,682	0,131
4	25,749	3,322	0,129
5	30,944	3,985	0,129

B Closed-circuit test

To carry out this test, the experimental setup shown in Fig. 3 was considered.

Using the K_t value shown in Chart III, it is possible to estimate the torque τ_m produced by the permanent magnet DC motor, measuring the armature current I_a as it is shown in Fig. 5. As we want to generate a variable torque τ_m , we use a variable resistor R_{test} . The estimated torque τ_m produced by the GS Electric Motor is obtained by applying equation 2.

$$\tau_m = K_t I_a \quad (2)$$

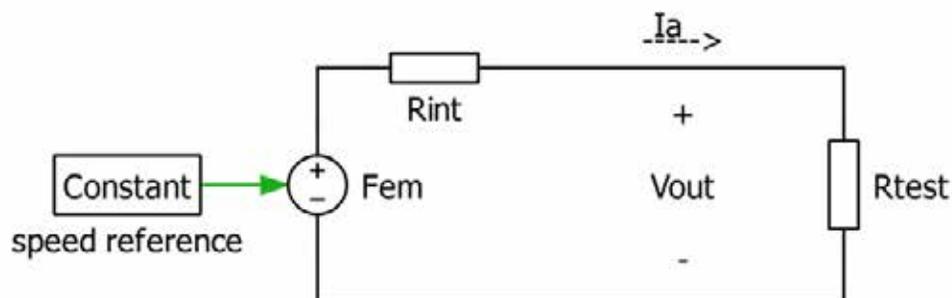


Fig. 5. Closed-circuit test.

The results of the closed-circuit test are shown in Chart IV Also, it includes the mean value of the current measurements delivered by the power supply to the BLAC motor.

CHART IV
TORQUE TEST DATA.

Prueba	Current from the power supply DC source (A)	Voltage V_{out} (V)	Current I_a (A)	R_{test} (Ω)	Torque (Nm)
1	2,804	0,584	0,807	0,724	0,103
2	2,397	1,594	0,521	3,058	0,066
3	2,278	2,139	0,386	5,545	0,049
4	2,238	2,444	0,299	8,188	0,038
5	2,138	3,043	0,179	17,035	0,023
6	1,800	3,150	0,151	20,913	0,019
7	1,585	3,207	0,133	24,137	0,017
8	1,498	3,291	0,118	27,941	0,015

From Tab. 4, it can be seen, when increasing the resistor value R_{test} , the torque τ_m is reduced, which is expected according to equation 2. This chart also shows that the current delivered by the power supply decreases when the resistor value R_{test} is increased, which represents an indirect way to validate the torque reduction perceived by the BLAC motor as it can be seen in Fig. 6b. The current delivered by the power supply in test 1, 4 and 8 is presented also in Fig. 6a.

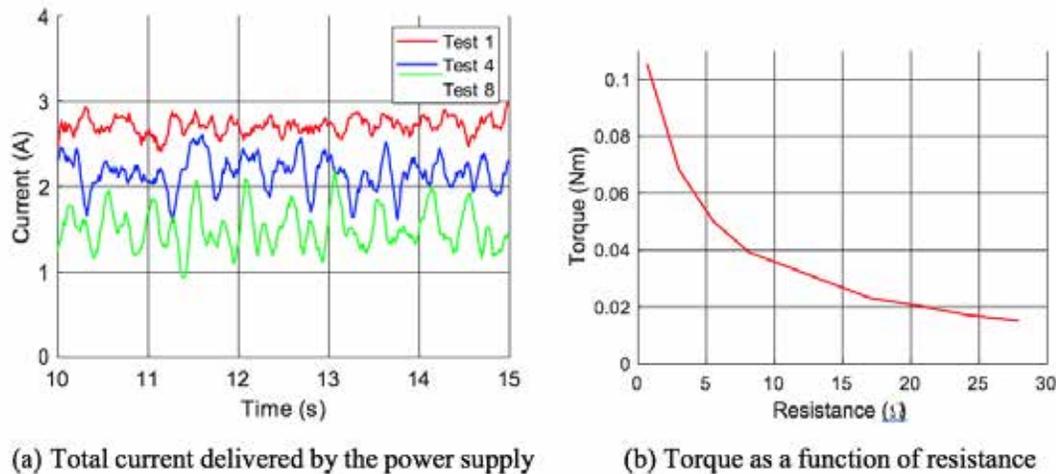


Fig. 6. Variable torque results.

It is important to clarify that in the previous analysis we are not taking into account the mechanical losses (friction in the belt and friction in the bearings of the two motors added together), as well as, the electrical losses in both machines. We expect to do this analysis in future works. We only focused on the implementation of a variable mechanical load based on changing the torque produced by the GS Electric Motor using a test resistor.

As it was mentioned in section I, one of the purposes to have an experimental setup for variable load generation was the calibration of current sensors used in the control system for the BLAC motor. When the speed control algorithm of the BLAC motor was developed, the current sensors had an offset (DC value) in the three-phase currents, and therefore, a routine for offset adjustment was made before the control algorithm for the BLAC motor runs. Using this experimental setup, we validated that the offset adjustment is suitable using different load conditions as it can be seen in Fig. 7, that shows the three-phase currents for test 1, 4 and 8 centered in zero value.

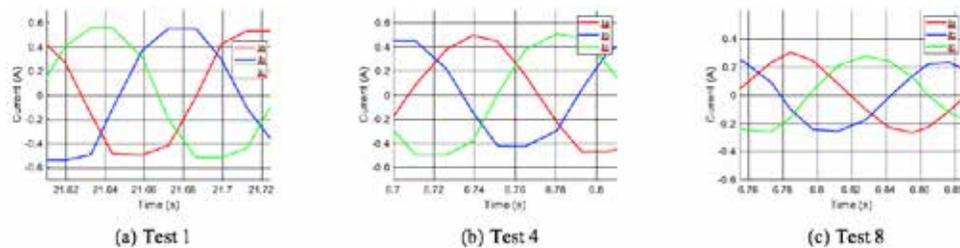


Fig. 7. Three phase currents in BLAC motor.

IV. CONCLUSIONS

A variable load generator system for a BLAC motor was designed using a system composed by a permanent magnet DC motor, pulleys, and a belt. The implemented experimental setup is low-cost when compared with other existing techniques for load emulation and it was designed using open-source tools.

The variable mechanical load generation was validated through a variation of the armature current in the permanent magnet DC motor using a variable resistor. Also, the current delivered by the power supply verified the behavior expected.

Finally, one of the many applications of the variable load generation system was presented through the calibration of the current sensors used by the control system of the BLAC motor.

V. REFERENCES

- [1] L. A. Silva, B. de Jesus Cardoso, and F. P. Pujatti, "Human-robot cooperation system with mechanical impedance emulation for friendly human perception," in *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, 2013, pp. 935–936. DOI: 10.1109/ICCVE.2013.6799932.
- [2] M. Rodic, K. Jezernik, and M. Trlep, "Control design in mechatronic systems using dynamic emulation of mechanical loads," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, vol. 4, 2005, pp. 1635–1640. DOI: 10.1109/ISIE.2005.1529177.
- [3] C. Hewson, G. Asher, and M. Sumner, "Dynamometer control for emulation of mechanical loads," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No.98CH36242)*, vol. 2, 1998, pp. 1511–1518. DOI: 10.1109/IAS.1998.730342.
- [4] H. Zha and Z. Zong, "Emulating electric vehicle's mechanical inertia using an electric dynamometer," in *2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, vol. 2, 2010, pp. 100–103. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.145.

- [5] L. Suchý, K. Kyslan, Z. Ferková, and F. Durovský, “Dynamic emulation of mechanical loads – analysis and implementation into industrial drive,” in *2016 ELEKTRO*, 2016, pp. 238–242. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512072.
- [6] M. A. A. Pedrasa and V. L. S. Delfin, “Low cost mechanical load emulator,” in *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*, 2006, pp. 1–3. DOI: 10.1109/TENCON.2006.343740.

Estudio energético de un sistema computacional para un robot humanoide bajo condiciones de estrés

Energetic study of a computational system for a humanoid zrobot under stress loads

Matías Ernesto Leandro Flores

Estudiante, Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

correo electrónico: matias.leandro@ucr.ac.cr

0000-0002-7442-2025

Federico Ruiz Ugalde

Investigador, Instituto de Investigaciones en Ingeniería Universidad de Costa Rica

correo electrónico: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr

0000-0001-8563-4341

Palabras clave:

Benchmarks, estrés computacional, potencia, eficiencia, robot humanoide.

Keywords:

Benchmarks, computational stress, power, efficiency, humanoid robot.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enfoca en realizar un análisis del consumo energético de la plataforma computacional del robot humanoide del ARCOS-Lab (Autonomous Robots and Cognitive Systems Laboratory) de la Universidad de Costa Rica utilizando pruebas de desempeño, o benchmarks, para generar distintos tipos de carga computacional. Se expande del trabajo realizado sobre la misma plataforma en el año 2021, pero esta vez utilizando la tarjeta gráfica dedicada que utilizará al ponerse en operación, que genera una carga considerablemente mayor, y además, se termina de medir todas las líneas de poder de la fuente de poder especializada de la computadora del robot humanoide. De esta forma, se logra ejecutar una metodología para obtener métricas del consumo energético de un sistema computacional utilizando benchmarks, y se obtienen valores para el consumo de potencia total del sistema bajo distintos tipos de carga. Con estos valores, se determina la eficiencia experimental de la fuente de poder especializada, así como el tiempo de autonomía mínimo (bajo consumo máximo) del sistema del robot humanoide móvil.

En sistemas computacionales de alto desempeño, la potencia que se demanda ha emergido como una importante restricción de diseño [1]. La consideración energética se vuelve aún más importante en sistemas portátiles o móviles, como en aplicaciones de robótica, debido a la implicación que tiene el consumo en el tiempo de autonomía. La gran mayoría de hardware carece de infraestructura

integrada para medir la potencia y el consumo energético del sistema con suficiente exactitud [2], y obtener valores reales de potencia y consumo para condiciones de carga computacional cercanas al máximo es importante para determinar la capacidad de potencia máxima continua que debe poder entregar la fuente de poder y la eficiencia real de este, así como el tiempo de autonomía mínimo de acuerdo a la capacidad de las baterías.

El presente trabajo se enfoca en realizar un análisis energético de la plataforma computacional del robot humanoide del ARCOS-Lab de la Universidad de Costa Rica utilizando pruebas de desempeño, o *benchmarks*, para crear condiciones elevadas de estrés, y expande sobre el trabajo realizado en el año 2021 en la misma plataforma, ahora utilizando una tarjeta gráfica dedicada de alto desempeño, lo cual incrementa el consumo máximo del sistema, y añadiendo las métricas de consumo energético para todos los componentes de la computadora alimentados por la fuente de poder.

Así, se pretende obtener métricas del consumo de potencia total bajo estrés del sistema utilizando benchmarks, estimar la eficiencia real de la fuente de poder, así como el tiempo de autonomía mínimo de las baterías para el robot móvil, y de esta forma, establecer una manera de obtener métricas de potencia y desempeño energético aplicando benchmarks y mediciones en las señales de alimentación de la fuente de poder.

II. MÉTODOS

A. Aumento de carga computacional por medio de benchmarks

El concepto de benchmark se refiere a una prueba o programa utilizado para evaluar el rendimiento de una solución bajo ciertas condiciones [3]. Por otro lado, en este contexto, el estrés se puede definir como condiciones de carga en las que cierta propiedad de un sistema está cercana a exhibir fallos [4].

En el laboratorio del ARCOS-Lab de la Universidad de Costa Rica se cuenta con un robot humanoide que se alimenta con baterías de 48 V, por lo que utiliza una fuente de poder especializada que funciona con 48 V DC de entrada, con una capacidad nominal de 750 W (PSTC-48750). Surgió entonces la necesidad de realizar pruebas bajo carga sobre esta fuente antes ponerla en operación. Consecuentemente, se realizó un análisis del consumo energético del sistema computacional por medio de distintas pruebas, obteniendo métricas de la potencia demandada bajo alta carga computacional.

Para poner bajo carga un sistema computacional se aplicaron benchmarks estandarizados, tanto individualmente como en paralelo, mediante el programa de desempeño *Phoronix Test Suite*. Se aplicaron pruebas específicas para estresar componentes de hardware esenciales de una computadora, entre estos la memoria RAM, el disco duro mecánico (HDD) y la unidad de estado sólido (SSD), la tarjeta gráfica (GPU), y la unidad de procesamiento (CPU). Además, se obtuvieron

métricas para las condiciones base de operación, cuando no se está ejecutando una prueba se muestran los benchmarks implementados en el sistema de prueba.

CUADRO I
BENCHMARKS A CORRER CON *PHORONIX TEST SUITE* PARA
DISTINTAS PARTES DE HARDWARE.

Prueba	Hardware	Prueba	Hardware
Ramspeed	RAM	Unigine Heaven	GPU
Stream	RAM	LuxCoreRender	GPU
MBW	RAM	RealSR-NCNN	GPU
FIO	Disco (HDD/SSD)	John the Ripper	CPU
Dbench	Disco (HDD/SSD)	Timed Linux Kernel Compile	CPU
Unpacking Linux Kernel	Disco (HDD/SSD)	NAMD Cuda	CPU + GPU

También se implementó una prueba de carga en paralelo, que consiste en la ejecución de varios benchmarks de alto consumo a la vez.

B. Metodología para la obtención de métricas de consumo

En el sistema de prueba sin baterías se utilizó la fuente de poder VOLTEQ HY5030EX de 110 V AC a 48 V DC para alimentar la fuente de poder de 48 V DC de la computadora del robot humanoide.

Para obtener los valores de potencia y consumo la metodología general consiste en ejecutar un programa de Python que corre varios benchmarks de distinto tipo secuencialmente y luego ejecuta varios benchmarks en paralelo. La meta es cargar los diferentes componentes del sistema para generar diferentes cargas eléctricas en la fuente de poder.

Antes de la ejecución, se conecta un medidor de corriente directa de gancho conectado a un osciloscopio que permite medir el valor de corriente en cada línea deseada de la fuente. Se determinó medir las líneas de 12V, 5V, 3.3V [5] ya que son las que presentan un consumo significativo. Al iniciar cada benchmark el experimentador espera a que el nivel de corriente incremente hasta un valor continuo máximo y anota el valor promedio de la señal, luego se espera a que el benchmark finalice para repetir el proceso en cada etapa del programa. Esta metodología se muestra en la Fig. 1.

En el caso del disco duro HDD, que corresponde a las líneas SATA Power HDD 12 V y SATA Power HDD 5V de los cuadros 2 y 3, solo se midió la potencia para las pruebas de disco, que corresponden a 'FIO', 'DBench' y 'Unpacking Linux Kernel'. Al correr el resto de pruebas, se asumió que las líneas SATA Power HDD consumen en inactivo (sin pruebas) y para la prueba de carga en paralelo consumen la potencia de la prueba de disco FIO. Es importante mencionar que no se contó con la incertidumbre de los medidores de corriente utilizados.



Fig. 1. Mediciones de corriente demandada durante pruebas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De la Tabla. 3 se observa que la corriente que consume la tarjeta gráfica (GPU PCIE 12 V) para las pruebas en paralelo es menor que la corriente que consume para las pruebas Unigine Heaven y RealSR-NCNN. Esto se debe a que la corriente en la prueba en paralelo se midió para el momento en el que la tarjeta madre estaría en su máximo consumo (15.17 A según la Tabla. 2) y en ese instante el CPU está saturado, por lo que no puede distribuirle la carga adecuadamente a la tarjeta gráfica.

Sumando para cada prueba la potencia que consumen las líneas de voltaje de cada componente se obtiene la potencia total de cada prueba, como se aprecia en la Tabla 4. De la Tabla 4 se determina que la potencia máxima se consiguió con la prueba NAMD Cuda que estresa tanto al CPU como a la tarjeta gráfica, con una potencia total del sistema de 342.493 W. Esta prueba es seguida por la prueba de carga en paralelo, que consiste en varias pruebas a la vez, con una potencia total del sistema de 328.706 W.

La prueba NAMD Cuda podría haber resultado en un mayor consumo que la prueba de carga en paralelo debido a que durante esta prueba se presenta una breve elevación drástica de corriente, aunque la corriente promedio estable consumida durante toda la prueba podría ser menor que la medida para la prueba en paralelo.

CUADRO II
CORRIENTES REGISTRADAS Y POTENCIA EN LAS LÍNEAS DE 12, 5 Y 3.3 V DE LA TARJETA MADRE, PARA CADA PRUEBA EJECUTADA.

Benchmark	24+8 ATX 12 V		24+8 ATX 5 V		24+8 ATX 3.3V	
	Corriente (A)	Potencia (W)	Corriente (A)	Potencia (W)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Sin pruebas	5.090	61.080	1.150	5.750	1.853	6.115
Ramspeed	7.920	95.040	1.320	6.600	1.993	6.577
Stream	13.930	167.160	1.710	8.550	1.970	6.501
MBW	7.360	88.320	1.240	6.200	2.013	6.643
FIO	5.320	63.840	1.200	6.000	3.080	10.164
Dbench	8.160	97.920	1.210	6.050	2.820	9.306
Unpacking Linux Kernel	7.040	84.480	1.210	6.050	2.890	9.537
Unigine Heaven	8.880	106.560	1.230	6.150	1.971	6.504
LuxCoreRender	8.660	103.920	1.220	6.100	2.008	6.626
RealSR-NCNN	6.380	76.560	1.200	6.000	1.912	6.310
John the Ripper	12.480	149.760	1.210	6.050	1.926	6.356
Timed Linux Kernel Compilation	7.460	89.520	1.210	6.050	1.956	6.455
NAMD Cuda	11.970	143.640	1.430	7.150	1.970	6.501
Pruebas en paralelo	15.170	182.040	1.710	8.550	3.060	10.098

CUADRO III
CORRIENTES REGISTRADAS Y POTENCIA EN LAS LINEAS DE 12 V DE LA TARJETA GRAFICA Y DE 12 V Y 5 V DEL DISCO DURO HDD.

Benchmark	GPU PCIE 12 V		SATA Power HDD 12 V		SATA Power HDD 5 V	
	Corriente (A)	Potencia (W)	Corriente (A)	Potencia (W)	Corriente (mA)	Potencia (W)
Sin pruebas	0.723	8.676	0.341	4.092	0.462	2.310
Ramspeed	0.707	8.484	-	-	-	-
Stream	0.804	9.648	-	-	-	-
MBW	0.917	11.004	-	-	-	-
FIO	0.894	10.728	0.399	4.788	0.790	3.95
Dbench	0.904	10.848	0.380	4.560	0.660	3.30
Unpacking Linux Kernel	0.879	10.548	0.376	4.512	0.630	3.15
Unigine Heaven	16.400	196.800	-	-	-	-
LuxCoreRender	7.720	92.640	-	-	-	-
RealSR-NCNN	14.560	174.720	-	-	-	-
John the Ripper	0.934	11.208	-	-	-	-
Timed Linux Kernel Compilation	0.927	11.124	-	-	-	-
NAMD Cuda	14.900	178.800	-	-	-	-
Pruebas en paralelo	9.940	119.280	-	-	-	-

CUADRO IV
POTENCIA TOTAL DEL SISTEMA DEMANDADA DURANTE CADA PRUEBA.

Benchmark	Potencia total (W)
Sin pruebas	88.023
Ramspeed	123.103
Stream	198.261
MBW	118.569
FIO	99.470
Dbench	131.984
Unpacking Linux Kernel	118.277
Unigine Heaven	322.416
LuxCoreRender	215.688
RealSR-NCNN	269.992
John the Ripper	179.776
Timed Linux Kernel Compilation	119.551
NAMD Cuda	342.493
Pruebas en paralelo	328.706

La Fig. 2 muestra la potencia demandada por el sistema total para las pruebas más demandantes de cada tipo de carga según componente que estresan.

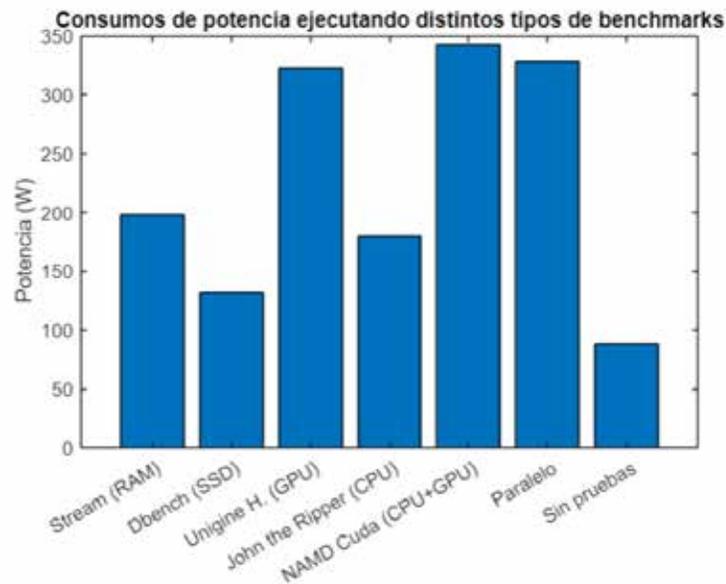


Fig. 2. Potencia total del sistema para las pruebas más demandantes de cada tipo de carga

Para el cálculo de la eficiencia de la fuente de poder de la computadora del robot humanoide se midió la corriente saliendo de la fuente de 110 AC a 48 V DC que entra a la fuente de poder de la computadora (I_{in}), para obtener la potencia de entrada como:

$$P_{in} = I_{in} \cdot 48 V \quad (1)$$

La potencia de salida de cada prueba, P_{out} , corresponde a las potencias totales entregadas por la fuente de poder de la computadora (Cuadro 4). De esta forma, la eficiencia se determina por la ecuación (2):

$$\eta\% = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (2)$$

Por restricciones de tiempo no se determinó la eficiencia para los catorce benchmarks, sino que se determinó para las pruebas más demandantes de cada tipo de carga, como se muestra en la TABLA 5.

CUADRO V
CALCULO DE EFICIENCIA Y MEDICION DE CORRIENTE Y POTENCIA DE
ENTRADA PARA PRUEBAS MÁS DEMANDANTES DE CADA TIPO DE CARGA.

Benchmark	Corriente entrada (A)	Potencia entrada (W)	Potencia salida (W)	Eficiencia (%)
Sin pruebas	1.84	88.32	88.023	99.66 %
Stream	5.49	263.52	198.261	75.24 %
Dbench	3.35	160.80	131.984	82.08 %
Unigine Heaven	8.00	384.00	322.416	83.96 %
John the Ripper	4.73	227.04	179.776	79.18 %
NAMD Cuda	9.50	456	342.493	75.11 %
Pruebas en paralelo	8.20	393.6	328.706	83.51 %

Del Cuadro V se muestra que la mayor eficiencia, de un 99.66 %, sucede cuando el sistema está en un estado de inactividad (sin pruebas), y conforme aumenta la carga esta eficiencia se reduce notablemente. También se observa por las pruebas Unigine Heaven y en paralelo que la eficiencia mejora ligeramente alrededor de los 300 W, pero vuelve a caer a una carga de 342 W (NAMD Cuda), lo cual es menos de la mitad de la capacidad nominal de 750 W de la fuente.

A partir de la potencia de entrada, es posible estimar el tiempo de autonomía del sistema computacional móvil. Utilizando baterías de 48 V con 22 AH para alimentar el sistema computacional del robot humanoide, el tiempo de autonomía estaría determinado como

$$T = \frac{48 V \cdot 22 Ah}{P_{in}} \quad (3)$$

Así, bajo la potencia de entrada máxima demandada a las baterías, que se obtuvo en la prueba NAMD Cuda, el tiempo de autonomía mínimo está dado por

$$T = \frac{48 V \cdot 22 AH}{456 W} = 2.31 \text{ horas} \quad (4)$$

Mientras que el tiempo de autonomía para el sistema en un estado inactivo, sin pruebas, corresponde a

$$T = \frac{48 V \cdot 22 AH}{88.32 W} = 11.96 \text{ horas} \quad (5)$$

IV. CONCLUSIONES

Se logró efectivamente crear condiciones de estrés para obtener un consumo de potencia elevado mediante pruebas de desempeño, o benchmarks, como se aprecia en la Fig. 2, donde se observa que se elevó la potencia demandada por el sistema considerablemente en comparación al sistema sin pruebas. Además, con la metodología implementada se obtuvieron métricas reales de potencia bajo distintos tipos de carga computacional utilizando benchmarks estandarizados, y se elevó la potencia de salida demandada por el sistema hasta un valor de 342.493 W. También se observa un gran contraste entre el tiempo de autonomía mínimo y el tiempo de autonomía sin ejecutar pruebas.

Con la determinación de la eficiencia experimental de la fuente de poder de la computadora del robot humanoide bajo distintas condiciones de estrés y el tiempo de autonomía mínimo, se comprueba que la metodología implementada se puede utilizar para realizar un análisis del desempeño y consumo energético de un sistema y una fuente de poder antes de poner estos bajo operación real.

La información determinada gracias a estas métricas de consumo energético es útil tanto para diseñar una fuente de poder adecuada, como para tener un entendimiento del funcionamiento de un sistema móvil de acuerdo al tipo de trabajo que vaya a ejecutar.

V. REFERENCIAS

- [1] R. Ge, X. Feng y K. Cameron, < Improvement of power-performance efficiency for high-end computing, > en *19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2005, 8 pp.-. DOI: 10.1109/IPDPS.2005.251.
- [2] B. Goel, S. A. McKee y M. Sjařlander, < Chapter two - Techniques to Measure, Model, and Manage Power, > en, ép. *Advances in Computers*, A. Hurson y A. Memon, eds., vol. 87, Elsevier, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396528-8.00002-X>.

- [3] S. Bouckaert, J. Gerwen, I. Moerman, S. C. Phillips y J. Wilander, < Benchmarking computers and computer networks,> *EU FIRE White Paper*, 2010.
- [4] H. Chan, < Accelerated stress testing for both hardware and software,> en *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004 - RAMS*, 2004, págs. 346-351. DOI: 10.1109/RAMS.2004.1285473.
- [5] Intel, *Desktop Platform Form Factors Power Supply, Design Guide*, Intel Corporation, jun. de 2018. dirección: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/design-guides/resellers-power-supply-design-guide-changes.pdf>.

Modelado de dos electrodomésticos típicos para ser utilizados por un robot humanoide en una cocina inteligente

Modeling of two typical household appliances to be used by a humanoid robot in a smart kitchen

Jannacy Montoya González

Estudiante, Escuela Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

correo electrónico: jannacy.montoya@ucr.ac.cr

0000-0003-0956-9642

Manfred Arce Tejada

Estudiante, Escuela Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

correo electrónico: manfred.arce@ucr.ac.cr

Prof. Ing. Federico Ruiz Ugalde, PhD.

Coordinador ARCOS-Lab, Escuela Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

correo electrónico: federico.ruizugalde@ucr.ac.cr

0000-0001-8563-4341

Palabras clave:

Curva, electrodoméstico, experimento, modelado, tiempo.

Keywords:

Curve, appliance, experiment, modeling, time.

I. RESUMEN

Este artículo trata acerca del modelado de dos electrodomésticos típicos de una vivienda: el hervidor eléctrico y la cafetera eléctrica. De forma general, en otros trabajos se ha abarcado este tema desde el punto de vista de consumo eléctrico de dichos aparatos, mientras que en el presente trabajo se aborda desde el punto de vista del tiempo, ya que se desea saber cuánto tiempo pueden durar estos dos electrodomésticos en hervir agua, para el caso del hervidor eléctrico, y en realizar diferentes cantidad de tazas de café en el caso de la cafetera eléctrica y para lograrlo se realizaron diferentes experimentos con casos distintos. Finalmente, se encontró la ecuación característica, mediante la curva de mejor ajuste, que describe el tiempo que duran estos electrodomésticos en llevar a cabo cada una de las tareas mencionadas anteriormente. Los datos recolectados son de suma importancia ya que serán utilizados por un robot humanoide en el entorno de una cocina inteligente, donde es necesario que este se encuentre familiarizado con cada una de las cosas que componen este entorno, dentro de las cuales se encuentran los electrodomésticos.

II. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más importantes, y difíciles, para la automatización ha sido su integración cercana a las personas en ambientes poco controlados. Algunos productos han intentado introducirse con algún éxito, pero siempre se presentan limitaciones.

En la actualidad la realidad del ser humano se compone de un número importante de rutinas, dentro de las cuales una de las principales, y más durante este tiempo de pandemia, es la que se tiene en el hogar, por lo que contar con un robot humanoide que sea capaz de facilitar las funciones diarias tendría un gran impacto en la sociedad, y para que esto pueda realizarse, es necesario que dicho robot conozca su entorno, y en el caso de la cocina, que es donde se centra este trabajo, los electrodomésticos conforman una parte primordial en este espacio, por lo que el robot debe tener la capacidad de utilizarlos de manera óptima, y esto implica que pueda contar con información relevante de los mismos para así entender su comportamiento. Yilmaz, et al [1], afirma que para lograr describir el comportamiento de uso de los electrodomésticos es necesario considerar 3 cosas: el número de eventos de encendido que ocurre durante un tiempo específico, la hora del día en que se produce cada evento de encendido y la duración del uso del aparato, siendo esta última en la cual se centrará este trabajo.

El modelado de los electrodomésticos ha sido enfocado principalmente en la parte del consumo de energía de los mismos, por ejemplo, de acuerdo con Candanedo et al. [2], los electrodomésticos consumen entre el 71 % y el 79 % de la energía eléctrica que se utiliza en un hogar de forma mensual, lo cual es bastante alto y justifica la importancia de entender a profundidad el funcionamiento de estos artefactos. Los modelos predictivos juegan un papel importante en este ámbito, ya que estos proporcionan el modelo que más se perezca al comportamiento real, a modo de ejemplo, Xiang et al. [3] utilizó cinco modelos predictivos para determinar el consumo de energía de los electrodomésticos: KNN, SVM, RF, ERF y LSTM, donde el último fue el que obtuvo el mejor resultado.

De los métodos mencionados anteriormente, cuatro de ellos son considerados como métodos tradicionales de aprendizaje: máquina de vectores de soporte (SVM), k vecino más cercano (KNN), bosque aleatorio (RF), bosque aleatorio extremo (ERF). SVM es un tipo de clasificador lineal generalizado para la clasificación binaria de datos según el aprendizaje supervisado. Mientras que el método de redes neuronales LSTM se considera un método de aprendizaje profundo para construir un modelo de predicción, consta de una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida y se encuentra basado en machine learning. [3].

De acuerdo con Villanueva [4] et al, la cantidad de veces que se usa un artefacto, así como el tiempo que dura realizando una tarea, son dos factores de suma importancia para lograr entender el funcionamiento de los mismos, en su trabajo, donde modela y simula el consumo eléctrico de electrodomésticos, divide los mismos en dos grupos, electrodomésticos de consumo eléctrico continuo y electrodomésticos de consumo eléctrico discontinuo, y afirma que la simulación de los consumos continuos es extrapolable a cualquier vivienda, ya que son los electrodomésticos más demandados en la mayoría de ellos. Para la secadora, lavadora y lavavajillas, es decir, los discontinuos, su uso puede ser muy variado, ya que la duración puede ser más larga o más corta,

y es aquí donde se encuentra la importancia de realizar el modelado de estos electrodomésticos y lograr predecir el tiempo que les lleva realizar sus tareas en diferentes escenarios a los cuales el robot podría enfrentarse.

El modelado de electrodomésticos ha sido explorado de forma limitada al consumo eléctrico de los mismos, sin embargo, el comportamiento y su predicción no ha tan sido explorada, a pesar de que Cetin [5] et al. afirman que el tiempo de uso de electrodomésticos también es útil para las empresas de servicios públicos, que deben predecir y satisfacer las necesidades eléctricas de sus clientes.

III. MODELADO DE ELECTRODOMÉSTICOS

A. Hervidor Eléctrico

Uno de los electrodomésticos que se ven normalmente en las casas es el hervidor eléctrico, y este se debe al uso tan práctico que se le puede dar, ya que en cuestión de minutos este logra hervir diferentes cantidad de agua para la preparación de tés, cafés y cualquier otro uso que se le quiera dar.

El funcionamiento de este artefacto es sumamente sencillo, al conectarlo al tomacorriente, la corriente eléctrica provoca que se caliente las resistencias internas del aparato, las cuales se encuentran en contacto con el agua que se desea calentar, por lo que entre más tiempo transcurra, más se va a elevar la temperatura del líquido hasta que llegue a su punto de ebullición, en ese momento, el electrodoméstico se apaga.

El interés en el hervidor eléctrico tiene como objetivo que sea manipulable por un robot humanoide para poder asistir al ser humano y ayudarlo con tareas cotidianas, como por ejemplo, hervir cierta cantidad de agua.

B. Cafetera eléctrica

La cafetera eléctrica también posee un funcionamiento sencillo, el cual consiste en un taque donde se vierte agua y se calienta a través de las resistencias internas que posee el artefacto. Una vez que el agua hierve esta pasa del tanque, mediante unas mangueras, hacia el filtro, el cual contiene café molido. El interés en este electrodoméstico se enfoca en que un robot humanoide pueda ayudar al ser humano en tareas básicos como preparar una cantidad específica de tazas de café.

IV. EXPERIMENTACIÓN

Para este artículo, se realizaron diversos experimentos para dos electrodomésticos en particular: un hervidor eléctrico para hervir agua y una cafetera eléctrica; con el fin de determinar el tiempo que estos duran a llevar acabo diferentes acciones. Cada uno de los experimentos se llevaron acabo en el Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab).

A. Hervidor Eléctrico

A.1. *Objetivo*

Determinar el tiempo que utiliza el hervidor eléctrico eléctrico para hervir diferentes cantidades de agua en diferentes casos proporcionados.

A.2. *Experimentos realizados*

- Caso 1: Agua recién salida del grifo. En este caso, el hervidor no ha sido utilizado durante un periodo de tiempo considerable.
- Caso 2: Agua a temperatura ambiente con el hervidor eléctrico ya utilizado una vez, lo que quiere decir que el electrodoméstico ha sido utilizado en un periodo de tiempo corto,
- Caso 3: Agua recién salida del grifo con el hervidor eléctrico ya utilizado una vez, lo que quiere decir que el electrodoméstico ha sido utilizado en un periodo de tiempo corto.

Nota: Para el Caso 1, se esperó 30 minutos entre cada una de las 3 pruebas para que el hervidor eléctrico se lograra enfriar. Para el Caso 2, para lograr que el agua estuviera a temperatura ambiente, se recolectaba la cantidad necesaria en un recipiente, y se dejaba reposar por 30 minutos.

B. Cafetera eléctrica

B.1. *Objetivo*

Determinar el tiempo (dependiendo de la temperatura inicial de la cafetera eléctrica) que necesita la cafetera eléctrica para realizar cierta cantidad de tazas de café dados diferentes casos. Se tomaron datos para dos tiempos diferentes, el primero (T1), el tiempo en el que la cafetera eléctrica termina de producir su sonido característico, para este momento ya todo el agua colocado en el electrodoméstico ha hervido y pasado del tanque de agua al filtro en donde se encuentra el café, sin embargo, se sabe que el proceso no termina ahí, ya que existe un segundo tiempo de interés, que es el momento en el que deja de salir el café desde el filtro hasta el hervidor eléctrico, este es el segundo tiempo de interés para este experimento (T2).

B.2. *Experimentos realizados*

Para realizar cada uno de los experimentos, se utilizó 10 gramos de café para cada taza de agua (125 ml).

- Caso 1: Agua recién salida del grifo. Cafetera eléctrica sin utilizar durante un periodo considerable de tiempo.
- Caso 2: Agua a temperatura ambiente. Cafetera eléctrica ya utilizada una o más veces durante un periodo de tiempo corto.

- Caso 3: Agua recién salida del grifo. Cafetera eléctrica ya utilizada una o más veces durante un periodo de tiempo corto.

Nota: Para el Caso 1, se contaba con un sensor de temperatura, por lo que se esperaba a que la temperatura dentro de la cafetera eléctrica volviera a estar cerca de la temperatura ambiente inicial para realizar la prueba. Para el Caso 2, para lograr que el agua estuviera a temperatura ambiente, se recolectaba la cantidad necesaria en un recipiente, y se dejaba reposar por 30 minutos.

V. RESULTADOS

A. Hervidor Eléctrico

CUADRO I
TABLA RESUMEN PARA LOS DATOS
OBTENIDOS EN PRUEBAS DE LOS TRES CASOS.

Nivel de agua [L]	Tiempo transcurrido [s]								
	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0.5	142.81	140.08	140.08	123	121.96	122.16	130.08	130	118.07
0.75	198.85	195.86	197.17	182.41	179.14	183.03	179.04	172.02	179.09
1	278.1	241.07	241.07	237.36	232.75	227.82	238	237.04	239.09
1.25	318.5	299.3	311.72	300.13	286.06	280.04	293.1	289.09	298.08
1.5	338.9	347.03	349.07	336.15	334.1	338.24	350.01	352.04	352.03

Donde: P1 = prueba 1, P2 = prueba 2 y P3 = prueba 3.

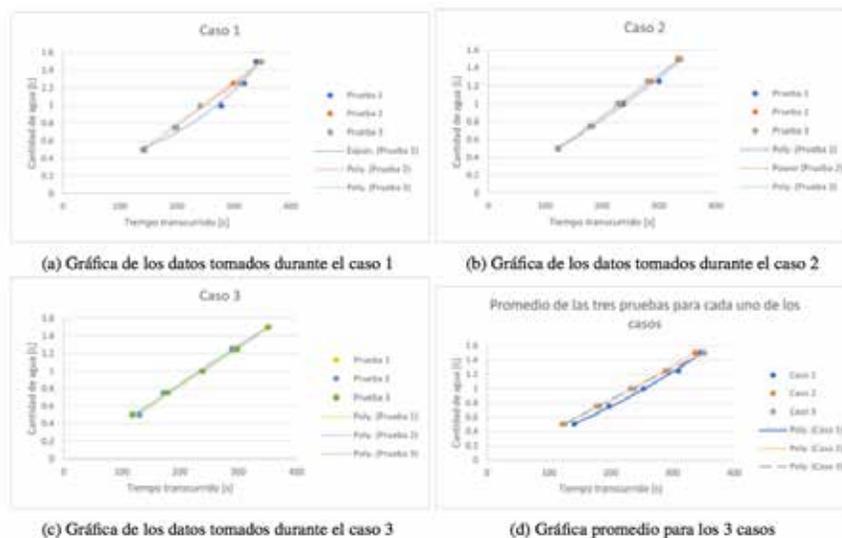


Fig. 1. Gráficas de los datos obtenidos en cada caso para el hervidor eléctrico

B. Cafetera eléctrica

CUADRO II

TABLA RESUMEN PARA LOS DATOS OBTENIDOS EN LOS TRES CASOS.

# tazas	Tiempo transcurrido [s]																				
	Caso 1					Caso 2					Caso 3										
	P1	T1	P2	T2	P3	T1	T2	P1	T1	T2	P3	T1	T2	P1	T1	T2	P2	T1	T2	P3	T1
2	185.98	228.86	182.17	226.75	190.08	231.56	175.54	244.60	177.12	147.56	184.32	258.16	161.80	298.67	162.13	300.14	144.93	195.57			
4	268.48	389.43	266.67	380.56	265.89	378.56	267.59	394.74	266.12	397.12	258.76	374.79	256.78	355.75	257.96	356.67	252.46	375.11			
6	344	598.37	345.23	601.88	356.89	573.89	371.11	563.64	369.92	566.18	363.74	546.2	333.92	524.66	335.17	527.28	322.52	510.16			
8	430.53	670.42	428.24	674.13	423.19	574.6	405.66	633.38	404.25	635.56	394.82	574.6	417.38	616.65	416.58	620.23	427.12	574.6			

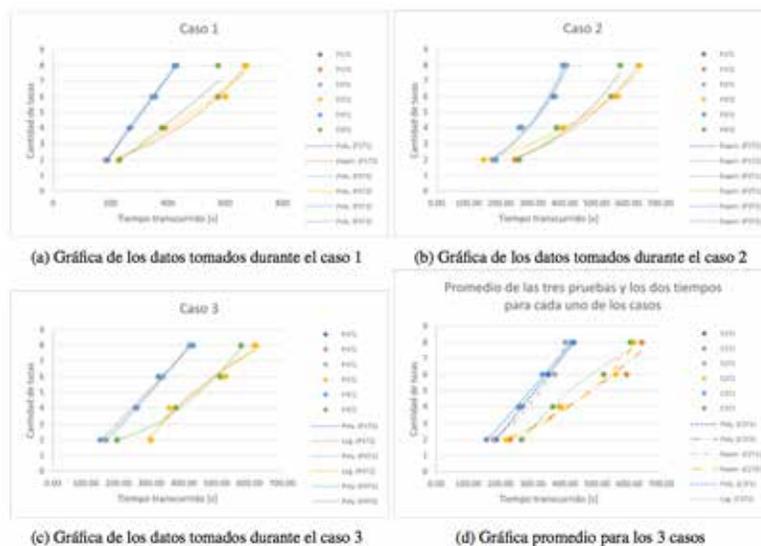


Fig. 2. Gráficas de los datos obtenidos en cada caso para la cafetera eléctrica

VI. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A. Hervidor eléctrico

Se desea encontrar la curva de mejor ajuste para este electrodoméstico para cada uno de los casos ya mencionados, para eso se procede a analizar cada una de las pruebas por separado y ver cuál de las curvas de mejor ajuste se adaptan mejor al modelo para así escoger la más óptima por lo cual se utilizó el método de de mínimos cuadrados (R^2) como se muestra a continuación:

CUADRO III
VALORES DE R^2 ENCONTRADOS AL EVALUAR LA LÍNEA DE MEJOR AJUSTE EN CADA PRUEBA PARA LOS 3 CASOS PARA EL HERVIDOR ELÉCTRICO.

Línea tendencia	Valor de R^2								
	Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Curva mejor ajuste	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Exponencial, $y = a^x$	0.9817	0.9764	0.977	0.9884	0.9839	0.9686	0.9711	0.9622	0.9822
Lineal, $y = mx + b$	0.9581	0.9988	0.9932	0.9936	0.9991	0.9979	0.9993	0.996	0.9995
Logarítmica, $y = \ln(x)$	0.9218	0.9794	0.9743	0.9612	0.9694	0.9722	0.9849	0.9886	0.9684
Polinomial orden 2, $y = ax^2 + bx + c$	0.9789	0.9988	0.9933	0.9962	0.999	0.9979	0.9996	0.9975	0.9999
Potencial, $y = x^a$	0.9628	0.9983	0.993	0.9945	0.9996	0.9978	0.9986	0.995	0.9995

Para el primer caso, como se observa en el Cuadro III para la Prueba 1, la curva de mejor ajuste, es decir, la que posee el valor de R^2 más cercano a 1, es la curva exponencial, para la Prueba 2 las

curvas lineal y polinomial tienen el mismo valor de R^2 y para Prueba 3 el valor de R^2 lo posee la curva polinomial, por lo que se tomó la decisión de utilizar la curva con el ajuste polinomial de grado 2.

Ahora, en el segundo caso, para la Prueba 1, la curva de mejor ajuste es la polinomial, para la Prueba 2 es la potencial y para la Prueba 3 las curvas lineal y polinomial tienen el mismo valor de R^2 , por lo que se tomó la decisión de utilizar la curva con el ajuste polinomial de grado 2.

Finalmente, en el tercer caso observando el Cuadro, la línea de tendencia polinomial es la que posee el valor de R^2 más cercano a 1 para las tres pruebas, por lo que también se escoge la línea de tendencia polinomial.

Una vez que se escogió la curva de mejor ajuste para cada uno de los casos, se procede a realizar un promedio de los tiempos obtenidos en las 3 pruebas y aplicarle a la gráfica obtenida la curva de ajuste polinomial para así obtener su ecuación, como se muestra en el Cuadro IV.

CUADRO IV
TABLA RESUMEN DE LAS ECUACIONES DE MEJOR AJUSTE
PARA EL HERVIDOR ELÉCTRICO.

<i>Caso 1</i>	<i>Caso 2</i>	<i>Caso 3</i>
$y = 5x10^{-06}x^2 + 0,0023x + 0,0785[s]$	$y = 2x10^{-06}x^2 + 0,0037x + 0,0016[s]$	$y = -8x10^{-07}x^2 + 0,0048x - 0,0842[s]$
$R^2 = 0,9971$	$R^2 = 0,9996$	$R^2 = 0,9995$

Además, cabe destacar que de los 3 casos, aunque la diferencia es poca, el caso 2 es el que posee los menores tiempos, que es lo que se esperaba, ya que para este caso, la cafetera eléctrica se encuentra caliente y el agua está a temperatura ambiente. El siguiente caso de menor tiempo es el caso 3, en el cual aunque el agua está recién salida del grifo, es decir, un poco más fría a que si estuviera a temperatura ambiente, la cafetera eléctrica ya se encuentra caliente. Y por último, como se esperaba, el caso 1 es el que posee los mayores tiempos, ya que se hacen las pruebas con la cafetera eléctrica en frío, lo cual conlleva que la resistencia dure un poco más en lograr hervir el agua, y además esta última está recién salida del grifo.

Al igual que con el hervidor eléctrico eléctrico, se desea encontrar la curva de mejor ajuste mediante el valor de R^2 y así encontrar la ecuación que mejor describe el comportamiento para cada uno de los tres casos. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5, y el modelo que mejor se adapta a cada prueba su muestra en el Cuadro VI.

Entonces, para el caso 1 se escogió la curva polinomial de grado 2 para ambos T, para el caso 2 la curva exponencial para ambos T y para el caso 3 la curva polinomial de grado 2 para T1 y la curva logarítmica para T2.

B. Cafetera eléctrica

CUADRO V
VALORES DE R2 ENCONTRADOS AL EVALUAR LA LÍNEA DE MEJOR AJUSTE EN CADA PRUEBA
PARA LOS 3 CASOS PARA LA CAFETERA ELÉCTRICA.

Línea de tendencia Curva mejor ajuste	Valor de R^2																	
	Caso 1					Caso 2					Caso 3							
	P1	T1	T2	P2	P3	P1	T1	T2	P2	P3	P1	T1	T2	P2	P3			
Exponencial, $y = a^x$	0.9539	0.977	0.9612	0.9724	0.9746	0.8919	0.9797	0.9854	0.9786	0.9894	0.9698	0.9452	0.9679	0.9456	0.9708	0.9449	0.9487	0.995
Lineal, $y = mx + b$	0.9994	0.9697	0.9998	0.9682	0.9967	0.9003	0.9648	0.9747	0.9655	0.9425	0.9639	0.9415	0.9983	0.968	0.9978	0.9672	0.9938	0.9603
Logarítmica, $y = \ln(x)$	0.9857	0.9356	0.9823	0.9392	0.9807	0.8823	0.9336	0.9391	0.9365	0.8493	0.9454	0.9248	0.9688	0.9712	0.9667	0.9705	0.9609	0.8969
Polinomial orden 2, $y = ax^2 + bx + c$	0.9995	0.9766	0.9998	0.9728	0.9973	0.9012	0.9771	0.985	0.9763	0.9879	0.9692	0.945	0.9993	0.969	0.9994	0.9683	0.9939	0.9923
Potencial, $y = x^a$	0.991	0.9731	0.9944	0.9705	0.9946	0.9011	0.9739	0.9816	0.9739	0.9342	0.9687	0.9445	0.9982	0.9608	0.9988	0.96	0.9924	0.9705

CUADRO VI
CURVAS DE MEJOR AJUSTE PARA CADA PRUEBA.

Caso 1			Caso 2			Caso 3		
Prueba	Tiempo	Curva de mejor ajuste por prueba	Prueba	Tiempo	Curva de mejor ajuste por prueba	Prueba	Tiempo	Curva de mejor ajuste por prueba
1	T1	Polinomial grado 2	1	T1	Exponencial	1	T1	Polinomial grado 2
	T2	Exponencial		T2	Exponencial		T2	Logarítmico
2	T1	Polinomial grado 2	2	T1	Exponencial	2	T1	Polinomial grado 2
	T2	Polinomial grado 2		T2	Exponencial		T2	Logarítmico
3	T1	Polinomial grado 2	3	T1	Exponencial	3	T1	Polinomial grado 2
	T2	Polinomial grado 2		T2	Exponencial		T2	Polinomial grado 2

CUADRO VII
TABLA RESUMEN DE LAS ECUACIONES DE MEJOR AJUSTE PARA LA CAFETERA ELÉCTRICA.

Caso 1	Caso 2	Caso 3
$y_{T1} = 2x10^{-06}x^2 + 0,0235x^{-2},4388$	$y_{T1} = 0,7503e^{0,0059}$	$y_{T1} = 7x10^{-06}x^2 + 0,0188x - 1,1531$
$y_{T2} = 1x10^{-05}x^2 + 0,0036x + 0,708$	$y_{T2} = 0,7503e^{0,0059}$	$y_{T2} = 6,8777\ln(x) - 36,491$

Nota: Todos los modelos descritos en la Tabla 7 se encuentran en la unidad de segundos [s].

VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizaron tres casos diferentes para cada uno de los electrodomésticos, y para verificar que los datos se tomaron correctamente, se realizó 3 pruebas para cada uno. Para el hervidor eléctrico, la curva de mejor ajuste para todos los casos fue la de polinomial de orden dos, mientras que para el caso de la cafetera eléctrica estas variaban dependiendo del caso en el que se estaba experimentando. Como se esperaba, el caso que presenta los menores tiempos para el hervidor eléctrico es en el que tanto el agua como el electrodoméstico se encuentran ya calientes, en el caso del agua, está a temperatura ambiente, y en el caso del hervidor eléctrico este ya ha sido utilizado recientemente. Se recomienda medir la temperatura del agua cuando se realizan los casosa temperatura ambiente y contar con un ambiente donde se pueda controlar la temperatura ambiente, como un cuarto con aire acondicionado, para garantizar igualdad de condiciones entre pruebas.

VIII. REFERENCIAS

- [1] S. Yilmaz, S. K. Firth y D. Allinson, < Occupant behaviour modelling in domestic buildings: the case of household electrical appliances,> *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 10, n.o 5-6, págs. 582-600, 2017. DOI: 10.1080/19401493.2017.1287775. eprint: <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1287775>. dirección: <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1287775>.
- [2] L. M. Candanedo, V. Feldheim y D. Deramaix, < Data driven prediction models of energy use of appliances in a low-energy house,> *Energy and Buildings*, vol. 140, págs. 81-97, 2017, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.083>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816308970>.
- [3] L. Xiang, T. Xie y W. Xie, < Prediction model of household appliance energy consumption based on machine learning,> *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1453, n.o 1, pág. 012 064, ene. de 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1453/1/012064. dirección: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1453/1/012064>.
- [4] D. Villanueva, D. San-Facundo, E. Miguez-García y A. Fernández-Otero, < Modeling and Simulation of Household Appliances Power Consumption,> *Applied Sciences*, vol. 12, pág. 3689, abr. de 2022. DOI: 10.3390/app12073689.
- [5] K. Cetin, P. Tabares-Velasco y A. Novoselac, < Appliance daily energy use in new residential buildings: Use profiles and variation in time-of-use,> *Energy and Buildings*, vol. 84, págs. 716-726, 2014, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.045>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814005854>.

Navegación autónoma de un robot móvil en un entorno de carreras virtual a escala

Autonomous navigation of a mobile robot in a scaled virtual racing environment

Esteban Rodríguez Quintana

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: esteban.rodriguezquintana@ucr.ac.cr*

Andrés Sedó Esquivel

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: andres.sedo@ucr.ac.cr*

Leonardo Marín Paniagua

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (CERLab), Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: leonardo.marin@ucr.ac.cr
ORCID 0000-0002-8986-642*

Palabras clave:

Ackermann, Braitenberg, Evasión de Obstáculos, Navegación Autónoma, Persecución Pura, Robótica Móvil, Seguimiento de Trayectorias.

Keywords:

Ackermann, Braitenberg, Obstacle Avoidance, Autonomous Navigation, Pure Pursuit, Mobile Robotics, Trajectory Tracking.

I. RESUMEN

En este trabajo se implementan algoritmos de navegación autónoma en un entorno de simulación virtual desarrollado por el proyecto de código abierto: *FITENTH*, utilizando un conjunto de bibliotecas de software y herramientas especializadas en robótica conocido como *Robot Operating System (ROS)*. La implementación de los algoritmos seleccionados ha sido realizada en el lenguaje de alto nivel Python. Se incluye la implementación del algoritmo de Persecución Pura y Braitenberg modificado, y adicionalmente, se propone la mezcla entre ambos para combinar sus comportamientos. Se aporta una mejora al algoritmo de Braitenberg, la cual está enfocada en la evasión de obstáculos mientras el vehículo viaja a alta velocidad. En las pruebas presentadas, para la selección adecuada de parámetros, los dos algoritmos son implementados de manera independiente, en donde tuvieron éxito en realizar recorridos sin colisiones, mientras que, para un recorrido con obstáculos estáticos, la mezcla de comportamientos por ponderación de estos algoritmos también cumplió con el objetivo de seguimiento de trayectoria deseada mientras

se realiza evasión de obstáculos de manera reactiva. Este último método incluye el seguimiento de trayectoria y además implementa la modificación propuesta para la evasión con Braitenberg.

II. INTRODUCCIÓN

El término *robot* viene del idioma checo, en el cual “*robota*” significa fuerza de trabajo. Este término fue utilizado por primera vez en 1921 por el dramaturgo checo Karel Capek, en su obra teatral “*Rosum’s Universal Robots*” [1]. A lo largo de las últimas décadas, desde los años cercanos a 1960: con la explosión de la revolución industrial; hasta la actualidad: con la aparición de tecnologías de la industria 3.0 y temas como la automatización de procesos y el creciente interés en la exploración interplanetaria, la robótica ha adquirido un papel fundamental en el desarrollo de gran cantidad de tecnologías y aplicaciones[2][3]. La robótica es un campo de estudio multidisciplinario que requiere del conocimiento y aporte de diversas ramas de las ciencias y la tecnología, como la ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica e ingeniería de control, así como, las ciencias de la computación, física, matemáticas y estadística [4], por mencionar solamente algunas.

Los robots móviles autónomos son robots que poseen la capacidad de navegar de forma autónoma a través del entorno que les rodea, mientras desarrollan tareas orientadas a cumplir un objetivo relacionado con su postura (posición y orientación) [3]. Dicha capacidad de navegación autónoma, dependerá de la configuración física y mecánica del robot, así como de su habilidad de percepción del entorno, capacidad de cómputo y de los algoritmos que rijan su comportamiento.

La naturaleza de este trabajo está ligada a la investigación e implementación de algoritmos de navegación en lenguajes de alto nivel en ambientes de simulación virtual, y se centra en brindar soluciones de navegación autónoma enfocadas en la competición de vehículos de Fórmula 1 a escala 1/10: F1TENTH.

III. ROBÓTICA MÓVIL Y ALGORITMOS DE NAVEGACIÓN

Un robot móvil es un conjunto de subsistemas robóticos (articulaciones, patas, ruedas, sensores, procesamiento, etc.) que requieren de mecanismos de locomoción que les permitan moverse a través de su entorno [5] y realizar distintas tareas objetivo [3]. La navegación autónoma de robots móviles se refiere a la capacidad que estos poseen de tomar decisiones por sí mismos, basadas su percepción del entorno a través de sensores, razón por la cual, los vehículos autónomos también requieren de métodos de localización robustos y precisos, especialmente cuando se mueven a alta velocidad [6].

Existen diversas técnicas de navegación enfocadas por ejemplo en la planificación de movimiento, la generación de trayectorias, el modelado de vehículos, la parametrización del control, la generación, evaluación y optimización de trayectorias, el desarrollo de perfiles de velocidad, la realización de cambio de línea (*carril*), giros en U, conducción defensiva, detección de error y recuperación, planificación de maniobras complejas, incorporación de obstáculos

dinámicos, seguimiento de trayectorias complejas y el estacionamiento en parqueos, todo lo anterior se aborda en [7], y además permite dimensionar la complejidad que implican las tareas de navegación autónoma. Asimismo, en [8] se definen los conceptos de planeamiento local y global de trayectorias que se aplican en el presente trabajo.

La toma de decisiones en los sistemas de conducción autónoma suele estar estructurada jerárquicamente en: planificación de ruta, decisión de comportamiento, planificación de movimiento local y control de retroalimentación [9], como se muestra en la Fig. 1b. Por otra parte, se pueden destacar algunas técnicas o algoritmos como: vehículos de Braitenberg [10], VFH+D [11], Algoritmos del insecto [12], *follow the gap* [13] y variantes, *Scan Matching* [14], filtro de partículas [15], localización basada en eventos [16], filtros de Kalman [17], mapeo y localización simultánea (SLAM) [18], Persecución Pura [19]-[21], RRT (*Rapidly-exploring Random Tree*) [22], generación y seguimiento de trayectorias por MPC [23], [24], optimización de velocidad [25] y de la línea de carrera [26], así como la detección y estimación de postura [27] y diversos métodos de control [28]-[30].

Los vehículos autónomos basan sus decisiones en los módulos de planificación para crear o encontrar un camino [8] que lleve al vehículo desde la posición actual hasta una posición final deseada. Adicionalmente, la evasión de obstáculos es un aspecto esencial para la navegación de un robot [11], por tal motivo, y especialmente en un entorno cerrado, como lo es una pista de carreras con obstáculos, es indispensable emplear algún método que permita realizar evasión de obstáculos y además el seguimiento de un trazado o plan de carrera. Lo anterior es uno de los motivos de peso por los cuales se propone en el presente artículo una modificación al algoritmo Braitenberg, enfocada a los recorridos en alta velocidad.

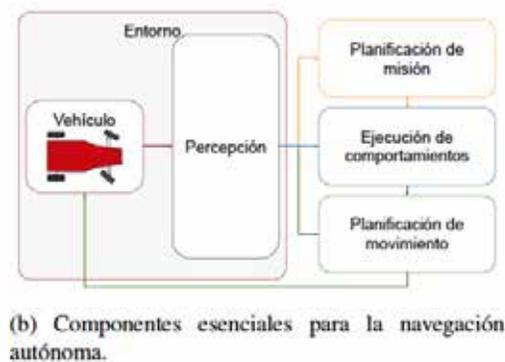
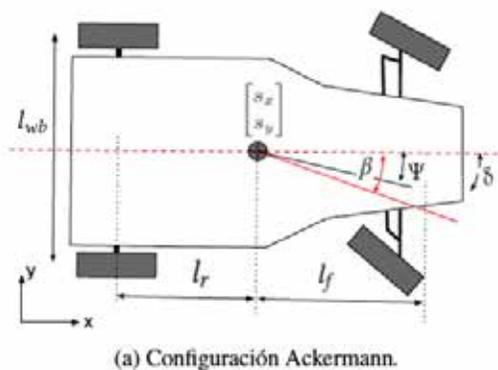


Fig. 1. Diagrama Ackerman y abstracción navegación autónoma.

A. Plataforma robótica móvil en configuración Ackerman

La configuración Ackermann es comúnmente conocida como *car-like* [31]. En el eje delantero, se ubican las dos ruedas destinadas a dar dirección y en el eje trasero las ruedas encargadas de dar

propulsión al vehículo, tal y como se muestra en la Fig. 1a. En [32], [33] se describe el desarrollo del modelado de este sistema mecánico.

IV. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

Esta investigación propone la implementación de un algoritmo de seguimiento de trayectorias mezclado con un evasor de obstáculos que permita realizar recorridos a alta velocidad en un entorno de carreras, virtual y a escala. Por esto, se propone realizar evasión de obstáculos utilizando una versión modificada del algoritmo de Braitenberg, la cual constituye el principal aporte de este trabajo, y además mezclar dicho comportamiento de evasión reactiva con el método de seguimiento de trayectorias conocido como Persecución Pura.

A. Persecución Pura

El algoritmo de Persecución Pura mostrado en la Fig. 2, trabaja calculando la curvatura (Fig. 2a) que lleva a un vehículo desde un punto A (posición actual) hasta una posición B (posición de destino) [20]. El objetivo principal de este algoritmo es seleccionar una posición de destino que se encuentre localizada a una distancia *lookahead* (Fig. 2b) de la posición actual del vehículo y encontrar un arco que une dichos puntos. Cada vez que se está cerca de alcanzar o se alcanza un punto, se cambia el punto de destino y se redefine el punto de partida.

Para este algoritmo es indispensable contar con una trayectoria de puntos precalculados del recorrido a realizar. Este algoritmo es una de las formas más efectivas de realizar seguimiento de trayectorias, sin embargo, su desempeño y precisión se ven limitadas por el parámetro de distancia *lookahead* [19]. La Tabla 1 muestra el funcionamiento del algoritmo implementado. En [20] se detalla el radio de giro y su inverso, de acá, el radio de curvatura y la curvatura de acuerdo con la ecuación 1.

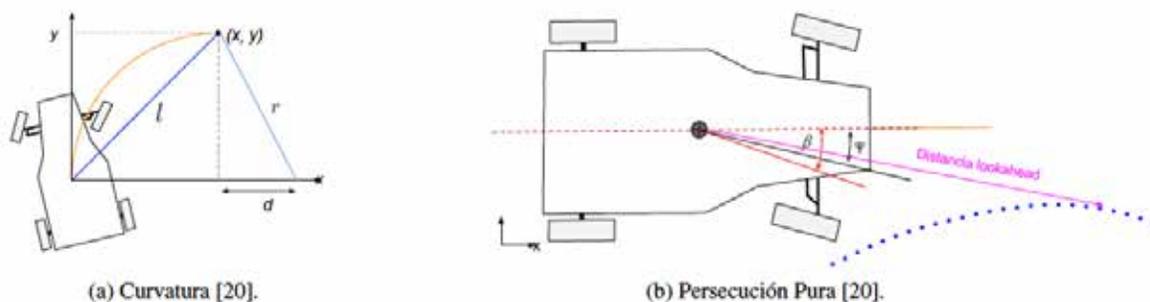


Fig. 2. Algoritmo de Persecución Pura.

$$r = \frac{l^2}{2x} \implies \gamma = \frac{2x}{l^2} \quad (1)$$

B. Braitenberg modificado

En el presente trabajo se propone una modificación al algoritmo de evasión de obstáculos presentado originalmente por Braitenberg [10], dicha modificación genera comandos para la dirección del robot que se ven determinados de manera proporcional a la lectura de sensores, en este caso el LiDAR. Esto hace que el comportamiento del robot sea considerado como “reactivo”[10], [34]. Para efectos de la propuesta realizada en esta investigación, se ha decidido partir en n segmentos iguales el campo de visión de 360° (ecuación 2) del sensor LiDAR y calcular el promedio de las mediciones interiores de cada segmento, para obtener un valor único asociado al mismo (ecuación 3).

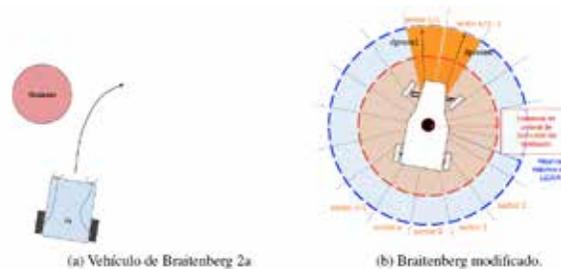


Fig. 3. Diagrama comparativo de algoritmos Braitenberg.

En la Fig. 3 se ejemplifica la diferencia entre el algoritmo original y la implementación propuesta. La diferencia principal radica en que Braitenberg utiliza únicamente 2 sensores unidireccionales frente al vehículo. Además, en la Tabla 2 se muestra el algoritmo propuesto que se basa en la idea de los vehículos de Braitenberg, pero implementa un sensor con lectura de 360° , rango del cual solamente se utiliza una porción de las mediciones tomadas para lograr evasión en alta velocidad.

$$\text{grados de segmento}_n = 360/n \quad (2)$$

$$\text{distancia prom}_n = \frac{\sum \text{distancia de mediciones}_n}{\text{cantidad de mediciones}_n} \quad (3)$$

La escogencia del parámetro n , que indica la cantidad de divisiones del campo de visión de las lecturas del sensor LiDAR, se realizó de tal manera que para efectos de la implementación, las únicas secciones que aporten al giro de las ruedas fueran las más frontales al vehículo, de tal manera que los sectores de datos importantes siempre fueran $\frac{n}{4}$ y $\frac{n-1}{4}$.

Esto se propone dado que en alta velocidad, lo más importante para nuestro enfoque es la evasión efectiva de obstáculos estáticos, tratando de mantener la línea de carrera lo más posible. El otro parámetro asignado para este algoritmo es la distancia de umbral (Fig 3b), la cual es la distancia de detección de obstáculos a partir de la cual los comandos de dirección comienzan a ser generados.

CUADRO I
PSEUDO CÓDIGO, PERSECUCIÓN PURA.

Algoritmo: Persecución pura

Entradas: Trayectoria (precalculada) $[X_{ref}, Y_{ref}, V_{ref}]$ y postura actual (Odometría)

Salidas: ángulo δ , velocidad v

Parámetros: l (Fig. 2a), P_{vgain}

Mientras No se envíe una señal de parada

Obtener postura $(x_{actual}, y_{actual}, \theta_{actual})$. Seleccionar un punto de la trayectoria precalculada:

Leer puntos de trayectoria.

Calcular al punto más cercano y su índice correspondiente en el arreglo de puntos. Calcular radio de curvatura de arco de intersección según (1).

Calcular actuación para cumplir con el arco que pasa por el punto deseado:

Calcular δ .

Calcular v con P_{vgain} .

Enviar comando a los actuadores

CUADRO II
PSEUDO CÓDIGO, BRAITENBERG MODIFICADO.

Algoritmo: Braitenberg Modificado

Entradas: Lecturas de sensor LiDAR 360°

Salidas: $\Delta\delta$

Parámetros: d_{umbral} (Fig. 3b)

Mientras No se envíe una señal de parada o se colisione Obtener lecturas LiDAR.

Computar los datos leídos:

Cantidad de segmentos y división, según (2).

Distancias promedios d_{prom0} y d_{prom1} , según (3). Tal que: $n/2 - 1$ es el segmento derecho y $n/2$ el izquierdo.

Si $d_{prom1} < d_{umbral}$, Entonces:

$\delta = \delta - \Delta\delta$

O si $d_{prom0} \leq d_{umbral}$, Entonces:

$\delta = \delta + \Delta\delta$

Si no, entonces:

$\delta = 0$

Aplicar comando obtenido en el paso anterior a las ruedas de dirección

C. Mezcla de comportamientos: Seguimiento de trayectorias + Evasión en alta velocidad

Esta es un método en la cual se mezclan por ponderación los comandos de velocidad y dirección que son generados por los dos algoritmos abordados anteriormente. Esta ponderación

se expresa en las ecuaciones 4 y 5, con los parámetros constantes: GSW ¹, LSW ², $GSTRW$ ³ y $LSTRW$ ⁴. Por tanto, se está asignando un peso a cada salida de velocidad y dirección para generar los comandos que permiten la evasión y seguimiento de trayectorias de manera efectiva para la selección correcta de parámetros.

$$v_{weighted} = GSW * v_{global} + LSW * v_{local} \quad (3)$$

$$\delta_{weighted} = GSTRW * \delta_{global} + LSTRW * \delta_{local} \quad (4)$$

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 5, se muestran las simulaciones de los 3 algoritmos en el circuito *Catalunya*. Al realizar la prueba inicial mostrada en la Fig. 4, se logra confirmar que la modificación propuesta para Braitenberg tiene la capacidad de evasión que es indispensable para cursar un circuito con obstáculos. Posteriormente, se realizaron iteraciones para los valores de n y d_{umbral} para el circuito de *Catalunya*, logrando encontrar varias parametrizaciones exitosas. Los mejores resultados logrados se obtienen para $n = 4$ con $d_{umbral} = 2$, tal como se muestra en la Fig. 5a. En el caso de Persecución Pura, se muestra que con $l = 2$ y $P_v = 0,75$ se logra hacer seguimiento de la trayectoria de referencia, cabe mencionar que la escogencia del parámetro l es crítica para este caso, ya que define cuán lejos se toma el siguiente punto a seguir en la trayectoria. En los casos donde l es muy pequeño, el vehículo tenderá a oscilar en el recorrido, puesto que su punto de referencia cambiará más a menudo en el tiempo en comparación a un valor alto de l , sin embargo, escoger un valor muy alto de l provocará que el arco que une los puntos de inicio y destino tenga una curvatura baja, lo cual puede ocasionar que no se logren tomar las curvas cerradas. P_{vgain} es una ganancia que modifica de manera proporcional el perfil de velocidad, tal que: $v = P_{vgain} V_{ref}$.

Uno de los resultados relevantes es que, para la mezcla de comportamientos, la escogencia del parámetro n es muy importante debido a que un valor bajo puede generar interferencia entre el seguimiento de trayectoria y la evasión de obstáculos, por ejemplo, cuando el vehículo esté cerca de las paredes del circuito. Por lo anterior, se debe tomar en consideración que al escoger este parámetro n , se busque que sea lo suficientemente pequeño para que los rangos de detección frontal no influyan negativamente sobre la acción de Persecución Pura y que a la vez sea capaz de detectar obstáculos dentro del rango de visión. Al iterar sobre los parámetros de peso global y local, se encontró que el comportamiento de evasión se puede volver más reactivo al utilizar valores equiparados de $LSTRW$ y $GSTRW$. Lo anterior se observa en las ampliaciones mostradas en las figuras

-
- 1 GSW : Global Speed Weight $\in [0, 1]$.
 - 2 LSW : Local Speed Weight $\in [0, 1]$.
 - 3 $GSTRW$: Global Steering Weight $\in [0, 1]$.
 - 4 $LSTRW$: Local Steering Weight $\in [0, 1]$

6a y 6b, donde aparte de ver mayor reactividad a obstáculos en la trayectoria, se aprecia que esa reactividad se vuelve perjudicial para el seguimiento de trayectoria, generando oscilaciones no deseadas respecto a Trayectoria ref. Dichas oscilaciones no deseadas ocurren cuando $LSTRW = 1$ y se atenúan en $LSTRW = 0,75$.

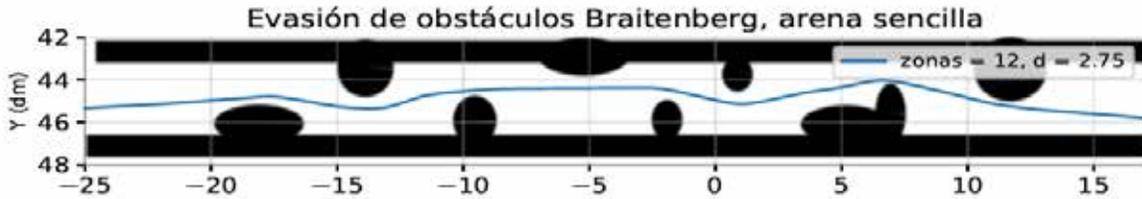


Fig. 4. Prueba inicial Braitenberg.

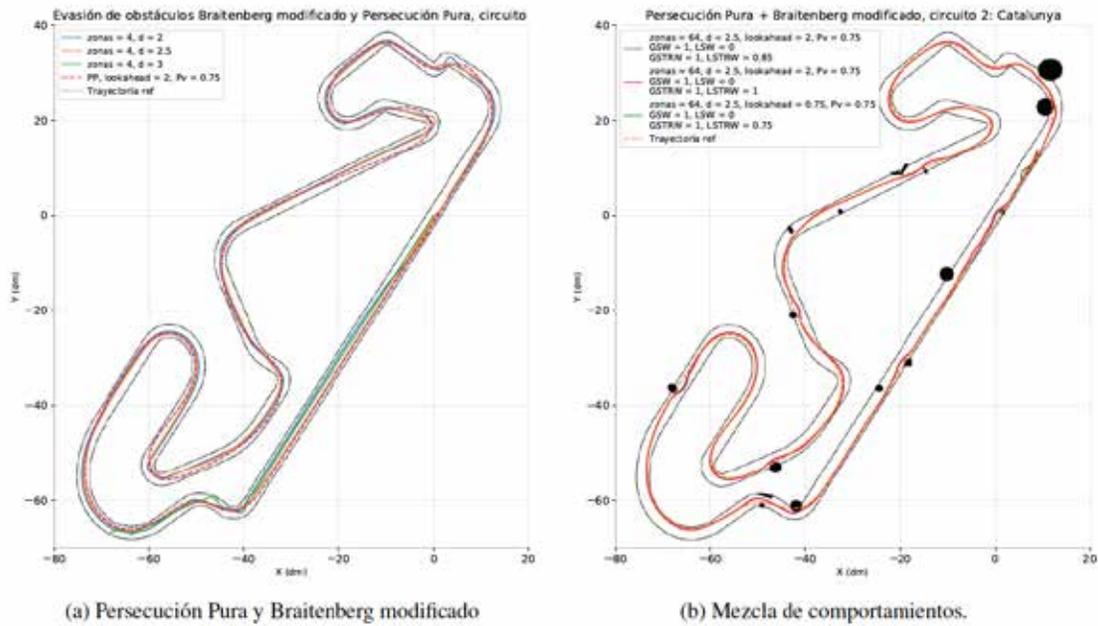


Fig. 5. Simulación algoritmos en circuito 2: Catalunya.

CUADRO III
CUADRO COMPARATIVO DE ÍNDICES DE DESEMPEÑO.

Índices Evaluados									
Algoritmo	Parámetros usados	T i e m p o de vuelta (s)	Circuito comple- tado	Velocidad Máxima (m/s)	Velocidad Promedio (m/s)	Ángulo de direc- ción δ promedio, absoluto (rad)	Índice de desempeño aso- ciado por ponde- ración	IAE zdistancia	
Persecución Pura	lookahead = 2, Pv gain = 0.75	88.257	1	6	5.4725	0.006863	2291.02	9.926×10^5	
Braitenberg Modificado	zonas = 4, dumberal = 2	119.102	1	4	3.99	0.005441	1877.56	-	
Mezcla de comportamientos	zonas = 64, dumberal = 2.5, lookahead = 2, Pv gain = 0.75, GSW = 1, LSW = 0, GSTRW = 1, LSTRW = 0.85	88.901	1	6	5.4767	0.007229	2169.8	3.574×10^6	
Mezcla de comportamientos	zonas = 64, dumberal = 2.5, lookahead = 2, Pv gain = 0.75, GSW = 1, LSW = 0, GSTRW = 1, LSTRW = 1	91.113	1	6	5.4352	0.008709	2162.61	3.781×10^6	

El Cuadro III resume algunos de los resultados obtenidos. Se destaca que, para la escogencia correcta de parámetros, los 3 algoritmos implementados, incluyendo la modificación a Braitenberg, logran finalizar circuitos completos, sin embargo, cabe hacer la distinción de que solamente la mezcla de comportamientos tiene la capacidad de seguir una trayectoria predefinida y a su vez evadir obstáculos. En el caso de Braitenberg modificado, la navegación se realiza completamente de manera reactiva y no bajo el seguimiento de un plan de carrera, como si ocurre para Persecución Pura (la cual a su vez no tiene capacidad de evadir obstáculos). Al analizar los resultados de *IAE distancia*⁵ y del *índice de desempeño por ponderación*⁶ del Cuadro III, sobresale que la distancia recorrida por Persecución Pura es evidentemente menor a los 2 casos mostrados para mezcla de comportamientos, sin embargo, hay que recordar que Persecución Pura no realiza evasión y que a pesar de lo anterior, la diferencia en *Tiempo de vuelta* no es tan significativa. Además, como ya se mencionó anteriormente, si comparamos los resultados para *Ángulo de dirección promedio, absoluto* en Mezcla de comportamientos, podemos destacar que, en efecto, hay mayor cambio promedio del ángulo de dirección, el cual se ve evidenciado en las oscilaciones no deseables mostradas en la Fig. 5b.

VI. CONCLUSIONES

- Bajo la parametrización correcta, los 3 algoritmos implementados, incluyendo la modificación a Braitenberg, lograron completar vueltas completas al circuito sin colisionar.
- Braitenberg modificado muestra flexibilidad de poder usarse en circuitos con y sin obstáculos. A pesar de realizar navegación completamente reactiva, esta mostró ser efectiva en las pruebas realizadas.
- Para Braitenberg modificado en circuitos sin obstáculos es efectivo utilizar valores pequeños de n en comparación con el alto valor que se utiliza para su implementación en mezcla de comportamientos.
- Al seleccionar el parámetro n para Braitenberg modificado en la Mezcla de comportamientos se debe de poner especial atención a que el valor sea lo suficientemente grande para que no inflencie de manera negativa al seguimiento de trayectorias.
- La parametrización de Mezcla de comportamientos supone un reto, ya que implica seleccionar, para Persecución Pura: l y P_v , para Braitenberg modificado: n y d_{umbral} y adicionalmente, los pesos GSW , LSW , $GSTRW$ y $LSTRW$, sin embargo, es fácilmente implementable y ajustable mediante distintas pruebas.

⁵ $IAE = \sum \sqrt{(rcf_x - Posc_x)^2 + (rcf_y - Posc_y)^2}$

⁶ $\frac{\text{tiempo de vuelta}}{0,5} + \text{circuito completado} * 1000 + Vel Max * 5 + |Ang. de dir. prom| + Vel Prom * 200$

VII. 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.

VIII. REFERENCIAS

- [1] A. Baturone, *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Marcombo, 2005, ISBN: 9788426713131. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=TtMfuy6FNCcC>.
- [2] F. Más, Q. Zhang y A. Hansen, *Mechatronics and Intelligent Systems for Off-road Vehicles*. Springer London, 2010, ISBN: 9781849964678. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=SveoDAEACAAJ>.
- [3] K. Berns y E. Puttkamer, *Autonomous Land Vehicles: Steps towards Service Robots*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009, ISBN: 9783834804211. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=bYa-wAEACAAJ>.
- [4] F. Reyes, *Robótica - control de robots manipuladores*. Alfaomega Grupo Editor, 2011, ISBN: 9786077073079. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=cULVDQAAQBAJ>.
- [5] R. Siegwart e I. Nourbakhsh, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, ép. A Bradford book. Bradford Book, 2004, ISBN: 9780262195027. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=gUbQ9%5Cweg88C>.
- [6] T. Stahl, A. Wischnewski, J. Betz y M. Lienkamp, < ROS-based localization of a race vehicle at high-speed using LIDAR.> *E3S Web of Conferences*, vol. 95, pág. 04 002, ene. de 2019. DOI: 10.1051/e3sconf/20199504002.
- [7] D. Ferguson, T. M. Howard y M. Likhachev, < Motion planning in urban environments: Part II,> en *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, págs. 1070-1076. DOI: 10.1109/IROS.2008.4651124.
- [8] P. Marin-Plaza, A. Hussein, D. Martin y A. d. I. Escalera, < Global and Local Path Planning Study in a ROS-Based Research Platform for Autonomous Vehicles.> *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2018, pág. 6 392 697, feb. de 2018, ISSN: 0197-6729. DOI: 10.1155/2018/6392697. dirección: <https://doi.org/10.1155/2018/6392697>.
- [9] B. Paden, M. Cáp, S. Z. Yong, D. Yershov y E. Frazzoli, < A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles.> *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, abr. de 2016. DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
- [10] V. Braitenberg, *Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology*, ép. Bradford Books. MIT Press, 1986, ISBN: 9780262521123. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=7KkUAT%5Cq%5CsQC>.
- [11] D. Díaz y L. Marín, < VFH+D: An Improvement on the VFH+ Algorithm for Dynamic Obstacle Avoidance and Local Planning.> *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, n.o 2, págs. 9590-9595, 2020, 21st IFAC World Congress, ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2450>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896320331360>.
- [12] L. Marín, M. Vallos, Á. Valera y P. Albertos, < Control de trayectorias en el robot móvil e-puck.> sep. de 2010.
- [13] V. Sezer y M. Gokasan, < A novel obstacle avoidance algorithm: "Follow the Gap Method".> *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, n.o 9, págs. 1123-1134, 2012.

- [14] J.-S. Gutmann y C. Schlegel, < AMOS: comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments, > en *Proceedings of the First Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EU-ROBOT '96)*, 1996, págs. 61-67. DOI: 10.1109/EURBOT.1996.551882.
- [15] J. Labora Gómez, < Análisis comparativo de algoritmos de localización de robots móviles basados en filtros de partículas, > 2020.
- [16] L. Marin, M. Valles, A. Soriano, A. Valera y P. Albertos, < Event-Based Localization in Ackermann Stee- ring Limited Resource Mobile Robots, > eng. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 19, n.o 4, págs. 1171-1182, 2014, ISSN: 1083-4435.
- [17] L. Marín, Á . Soriano, M. Vallés, Á . Valera y P. Albertos, < Event based distributed kalman filter for limited resource multirobot cooperative localization, > *Asian Journal of Control*, vol. 21, n.o 4, págs. 1531-1546, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/asjc.2141>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/asjc.2141>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/asjc.2141>.
- [18] Z. Xuexi, L. Guokun, F. Genping, X. Dongliang y L. Shiliu, < SLAM Algorithm Analysis of Mobile Robot Based on Lidar, > en *2019 Chinese Control Conference (CCC)*, 2019, págs. 4739-4745. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866200.
- [19] R. Wang, Y. Li, J. Fan, T. Wang y X. Chen, < A Novel Pure Pursuit Algorithm for Autonomous Vehicles Based on Salp Swarm Algorithm and Velocity Controller, > *IEEE Access*, vol. 8, págs. 166 525-166 540, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3023071.
- [20] R. C. Coulter, < Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm, > 1992.
- [21] M. Samuel, M. Hussein y M. B. Mohamad, < A review of some pure-pursuit based path tracking techni- ques for control of autonomous vehicle, > *International Journal of Computer Applications*, vol. 135, n.o 1, págs. 35-38, 2016.
- [22] J. J. Kuffner y S. M. LaValle, < RRT-connect: An efficient approach to single-query path planning, > en *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings* (Cat. No. 00CH37065), IEEE, vol. 2, 2000, págs. 995-1001.
- [23] F. Kuñhe, J. Gomes y W. Fetter, < Mobile robot trajectory tracking using model predictive control, > en *II IEEE latin-american robotics symposium*, Citeseer, vol. 51, 2005.
- [24] A. Bulsara, A. Raman, S. Kamarajugadda, M. Schmid y V. Krovi, < Obstacle Avoidance Using Model Predictive Control: An Implementation and Validation Study Using Scaled Vehicles, > abr. de 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0109.
- [25] L. Kang, H. Shen y A. Sarker, < Velocity optimization of pure electric vehicles with traffic dynamics consi- deration, > en *2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, IEEE, 2017, págs. 2206-2211.
- [26] A. Rucco, G. Notarstefano y J. Hauser, < An efficient minimum-time trajectory generation strategy for two- track car vehicles, > *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, n.o 4, págs. 1505-1519, 2015.
- [27] M. B. Alatise y G. P. Hancke, < Pose estimation of a mobile robot based on fusion of IMU data and vision data using an extended Kalman filter, > *Sensors*, vol. 17, n.o 10, pág. 2164, 2017.
- [28] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki y T. Noguchi, < A stable tracking control method for an auto- nomous mobile robot, > en *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1990, págs. 384-389.
- [29] K. Watanabe, J. Tang, M. Nakamura, S. Koga y T. Fukuda, < A fuzzy-Gaussian neural network and its application to mobile robot control, > *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 4, n.o 2, págs. 193-199, 1996.

- [30] S. G. Tzafestas, < Mobile robot control and navigation: A global overview,> *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 91, n.o 1, págs. 35-58, 2018.
- [31] J. Laumond y M. Overmars, *Algorithms for Robotic Motion and Manipulation: WAFR 1996*. CRC Press, 1997, ISBN: 9781439864524. dirección: <https://books.google.co.cr/books?id=pxK2DwAAQBAJ>.
- [32] M. Althoff, M. Koschi y S. Manzingger, < CommonRoad: Composable benchmarks for motion planning on roads,> *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2017. DOI: 10.1109/ivs.2017.7995802.
- [33] M. Althoff y Manzingger, *CommonRoad: Vehicle Models*. Technische Universitat Munchen, 2020. dirección: <https://gitlab.lrz.de/tum-cps/commonroad-vehicle-models>.
- [34] M. Saavedra Alcoba, M. Gutierrez Callejas y L. Enríquez Paz, < Análisis de Comportamientos de Vehículos de Braitenberg para la búsqueda robótica usando El Robot LEGO EV3,> es, *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, vol. 12, págs. 155-166, sep. de 2016, ISSN: 2071-081X.

Mejoramiento de la postura estimada en un robot móvil mediante el Filtro Kalman Unscented

Estimated pose improvement in a mobile robot using Unscented Kalman Filter

Andrés Sedó Esquivel

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (INII),
Escuela de Ingeniería Eléctrica UCR
correo electrónico: andres.sedo@ucr.ac.cr*

Esteban Rodríguez Quintana

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (INII),
Escuela de Ingeniería Eléctrica UCR
correo electrónico: esteban.rodriguezquintana@ucr.ac.cr*

Leonardo Marín Paniagua

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería de Control (INII),
Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: leonardo.marin@ucr.ac.cr
ORCID 0000-0002-8986-642X*

Palabras clave:

Estimador de Estados, Filtros Kalman Unscented, Fusión Sensorial, Gazebo, Simulación, ROS.

Keywords:

State Estimator, Kalman Unscented Filters, Sensory Fusion, Gazebo, Simulation, ROS.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza la implementación del filtro de Kalman *Unscented* para realizar la fusión sensorial y conseguir así el mejoramiento de la estimación de la postura de robots móviles en configuración diferencial, así como su navegación. Se parametriza, valida, implementa y simula el algoritmo de fusión sensorial con el filtro Kalman Unscented, el cual permite una mejor navegación al estimar la postura del robot de forma más precisa, a partir de las mediciones de los sensores con ruido y el modelo cinemático de la plataforma diferencial. Esto se realiza al validar e implementar el algoritmo con datos de robots reales en MATLAB y Python, así como su simulación en Gazebo-ROS; con trayectorias cuadrada y circular, estimando el desempeño de los filtros para cada una. Como resultado principal, se tienen los resultados de las simulaciones, incluyendo el índice de desempeño entre navegación y la estimación del estado del filtro, a partir de los cuales se puede concluir que el filtro mejora la estimación del estado del robot, mostrando un buen desempeño en todas las pruebas realizadas.

Los robots móviles autónomos deben ser capaces de navegar en el entorno, siguiendo una trayectoria (pre- definida o planificándola) y a su vez evitando obstáculos [1]; para que ello sea posible debe tener un medio de detección de su entorno (sensores) y ser capaz de calcular su ubicación en cada instante de tiempo. Para lograrlo se implementa un sistema de control estratificado en niveles o modularizado, de modo que el sistema sea capaz de determinar la velocidad y orientación del robot para seguir la trayectoria hasta su destino. El sistema de control, utilizando la información proveniente de los sensores, es capaz de determinar el estado del robot (la postura del mismo, correspondiente a su posición y orientación) y mediante el modelo cinemático y el planificador global, es capaz de determinar la trayectoria a seguir.

Los filtros de Kalman (KF, por sus siglas en inglés) han sido usados de forma extensa en la fusión sensorial, ya que permiten tomar datos provenientes de varios sensores con ruido, para extraer la mayor cantidad de información posible y mejorar así la estimación de la postura del robot [2]. Estas técnicas se suelen emplear para la estimación inercial y global, tanto para navegación de interiores como en exteriores [3]. El filtro Kalman tradicional (KF) se utiliza con modelos lineales del sistema, y para sistemas no lineales, se utiliza comúnmente el filtro Kalman extendido (EKF), el cual emplea una linealización de primer orden [2], [3], obteniendo el jacobiano del modelo no lineal, lo cual permite por ejemplo fusionar datos de un sensor de rango láser (Lidar, "Laser imaging Detection and Ranging") con la odometría (estimación inercial), y calcular el error de estimación [4]. Otro caso es presentado en [5] y [6] donde se fusionan las mediciones inerciales de una IMU (unidad de movimiento inercial) con las mediciones de los *encoder* de las llantas. Más recientemente se ha desarrollado el filtro Kalman Unscented (UKF), el cual considera directamente el modelo no lineal del sistema, es típico encontrarlo en aplicaciones como: fusión del giroscopio con la odometría para minimizar el error de estimación [7], [8], [9], [10]; estimación del deslizamiento del robot con mediciones de la odometría [11], o en aplicaciones de mejora de sistemas de localización de interiores mediante ultrasonido [12].

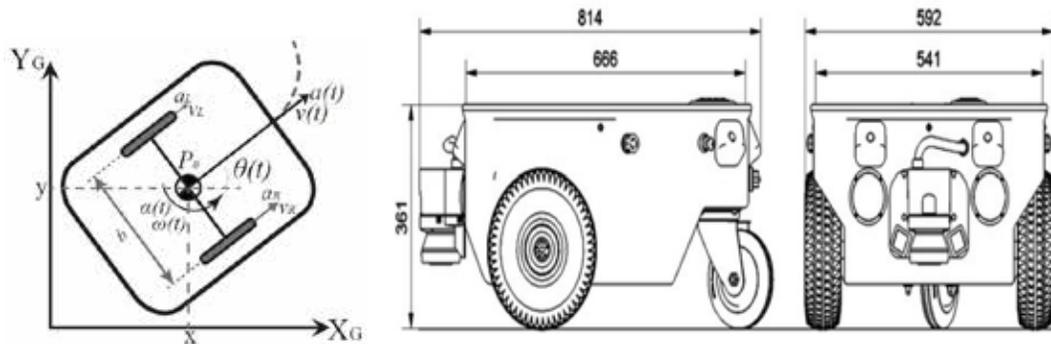
El filtro UKF presenta diferencias ventajosas para estimar de forma más precisa la postura del robot. Primero, al considerar este filtro, no se está linealizando el modelo del sistema en cada ciclo, sino que aproxima la función de densidad de probabilidad (*pdf*, por sus siglas en inglés) del modelo [13], de esta forma se logra una aproximación similar a como si se hubiera obtenido una linealización usando series de Taylor hasta el tercer polinomio, por lo que será una aproximación más precisa que las demás (ej. EKF), sin necesidad de emplear más recursos computacionales en el cálculo de Jacobianos. Además, considera parámetros de escalamiento que se pueden ajustar para disminuir o a aumentar la aproximación que se realiza a la *pdf* del sistema [2], [13], [3].

De esta forma, se plantea la utilización del UKF para efectuar la fusión sensorial con mayor precisión, considerando tres sensores diferentes: *encoder*, brújula y giroscopio, con el fin de mejorar la estimación de la postura, considerando un modelo no lineal de cinco estados del robot diferencial.

A. Navegación autónoma: Plataforma móvil diferencial

Un robot móvil en configuración diferencial (Fig. 1a) cuenta con 2 ruedas con radio r (28 mm para pruebas en MATLAB) paralelas con las que genera movimiento, separadas b (56 mm

para MATLAB), y en este caso, una tercera rueda como apoyo solamente. El robot tiene masa M_g y momento de inercia I_g [3]. El robot Neobotix MP-500 (Fig. 1b), es usado para realizar las simulaciones en el ambiente de Gazebo-ROS.



(a) Cinemática del robot diferencial [3] (b) Robot diferencial Neobotix MP-500 [14]

Fig. 1: Robot móvil en configuración diferencial.

Cada rueda tiene un motor independiente con capacidad de giro en ambas direcciones (horaria y antihoraria) y cuentan con un *encoder* que determina el desplazamiento angular del eje del motor. Además, cuenta con un giroscopio y una brújula que permiten calcular su orientación. También se supone que las ruedas no se deforman al girar, que no hay deslizamiento entre la rueda y el plano de contacto y que la rueda gira a la misma velocidad del eje del motor, porque a velocidades bajas (en las que opera el robot utilizado) este efecto es despreciable [3].

B. Navegación autónoma: Modelo cinemático y marcos de referencia

Considerando la configuración diferencial (Fig. 1a) y la velocidad de las ruedas v_R y v_L , entonces la velocidad lineal v y angular ω del sistema se considera en la ecuación 1.

$$v = \left[\frac{v_R + v_L}{2} \right], \quad \omega = \left[\frac{v_R - v_L}{b} \right] \quad (1)$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ \theta_k \\ v_k \\ \omega_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k-1} \\ y_{k-1} \\ \theta_{k-1} \\ v_{k-1} \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix} + T_s \cdot \begin{bmatrix} v_{k-1} \cdot \cos(\theta_{k-1} + 0,5 \cdot T_s \cdot \omega_{k-1}) \\ v_{k-1} \cdot \sin(\theta_{k-1} + 0,5 \cdot T_s \cdot \omega_{k-1}) \\ \omega_{k-1} \\ a_{k-1} \\ \alpha_{k-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Considerando v y ω como entradas del sistema, se define el modelo cinemático del sistema de cinco estados: posición en el eje x (X), posición en el eje y (Y), orientación (θ), velocidad lineal (V) y velocidad angular del robot (ω) [3], [15], [16], [17], según se muestra en la ecuación 3. Este modelo discreto considera el tiempo de muestreo $T_s = 50$ ms. Se define también la transformación de los marcos de referencia, de modo que los marcos de referencia individuales (local) estén vinculados al marco de referencia global. Para ello, se emplea la matriz de rotación de la ecuación 2 según [15], [17].

C. Navegación autónoma: Seguimiento de trayectoria - punto descentralizado

Este algoritmo permite seguir la trayectoria, sin considerar obstáculos, utilizando una función paramétrica en función del tiempo, que define la trayectoria deseada (ej. un cuadrado) [18]. El algoritmo sigue un punto que está separado por una distancia e del centro geométrico del robot [18], y a su vez, este punto sigue la trayectoria con una posición y velocidad dadas; lo que hace que el robot se mueva siguiendo la trayectoria establecida [3]. Este método considera como entrada los puntos de la trayectoria y la salida corresponde a la velocidad lineal y angular del robot. De esta forma, se encuentra la velocidad adecuada para cada rueda, con el fin de lograr seguir la trayectoria deseada. Este control se da con un PID en cada rueda [3]. Las ecuaciones y pasos utilizados se muestran en el Algoritmo 1, en donde las ganancias k_{px} y k_{py} se ajustan según las dimensiones del robot [3].

D. Navegación autónoma: Filtro de fusión sensorial: Kalman "Unscented"

Para la fusión sensorial se utiliza el filtro de Kalman *Unscented* [2] [13], este aproxima la densidad del modelo no lineal mediante la transformada Unscented, en lugar de linealizar el modelo del sistema, lo cual resulta en una mejor aproximación en la estimación [3], requiriendo un menor coste computacional al implementarse [2]. La metodología utilizada es adaptada de [2] y [13], según se resume en el algoritmo 2. Como adaptación propia del algoritmo, se repite una medición para que el número de estados sea igual al de mediciones, pero a esta se le da un peso tal que sea despreciable (según se explica en la Tabla 1) y así lograr matrices cuadradas, para asegurar la estabilidad numérica en el método de la raíz cuadrada, de acuerdo con los resultados reportados en [19].

El algoritmo considera m mediciones de sensores, un modelo del sistema de n estados y la función de medición (ecuación mostrada en la nota al pie 1), que relaciona las mediciones de los sensores (filas) con los estados (columna)⁷. Se inicializa el filtro con el valor esperado de los estados (línea 2) y los pesos de la estimación del estado y covarianza (líneas 3-5). Donde, L es la cantidad de puntos sigma, y $\lambda = \alpha^2(L+\kappa)-L$ es el parámetro de escalamiento. Considerando además que α determina el espaciamiento de los puntos sigma alrededor de x_k^+ ; κ es un segundo parámetro de escalamiento y β introduce a priori el conocimiento sobre la forma de la distribución de x . Se considera $\alpha = 1 \times 10^{-3}$, $\kappa = 0$ y $\beta = 2$ para distribuciones de Gauss [2], [19].

Seguidamente, se calcula los puntos sigma (líneas 7-8) aproximando la función de densidad del estado actual. En las líneas 10-11 se realiza la predicción del estado y la covarianza al pasar los puntos sigma por el modelo. Seguidamente (líneas 12-14) se introducen los puntos sigma en la función de medición para obtener la covarianza cruzada (línea 15) y la ganancia de Kalman (línea 16). Finalmente, se calcula el estado actual y la covarianza considerando la predicción y la corrección (líneas 17-18).

7 $H(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ (relacionando las filas (los sensores / Veloc, YangGiro, YangGiro, YangGiro) con las columnas de los estados que mide: x, Y, θ, V, ω)

Algoritmo 1: Algoritmo de Seguimiento de Trayectoria usando Punto descentralizado [18]

Entrada: $X_{ref}, Y_{ref}, x, y, \theta$	
Salida: v_L, v_R, v, ω	
Datos: distancia e , ganancias k_{px} y k_{py}	
1 para $X_{ref} - x > 0$ y $Y_{ref} - y > 0$ hacer	6 /* Cinemática Inversa */
/* Control cinemático	7 Calcular velocidades de las ruedas:
2 Calcular x_p y y_p :	8 $\begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = \frac{1}{e} \begin{bmatrix} e \cos \theta + 0, 5b \sin \theta & e \sin \theta - 0, 5b \cos \theta \\ e \cos \theta - 0, 5b \sin \theta & e \sin \theta + 0, 5b \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}$
3 $\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m + e \cos \theta \\ y_m + e \sin \theta \end{bmatrix}$	/* Actualizar del estado */
4 Calcular X_R y Y_R :	9 Calcular velocidad lineal y angular a partir de v_L y v_R .
5 $\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{px} & 0 \\ 0 & k_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ref} - (x_m + e \cdot \cos \theta) \\ Y_{ref} - (y_m + e \cdot \sin \theta) \end{bmatrix}$	10 $v = \left[\frac{v_R + v_L}{2} \right], \quad \omega = \left[\frac{v_R - v_L}{b} \right]$
	11 Se actualiza el estado al aplicar las ecuaciones del filtro de Kalman según sea el caso y el modelo de la ecuación 3.

Algoritmo 2: Algoritmo de Filtro Kalman *Unscented* [2]

Entrada: m mediciones [V_{linEnc} , V_{angEnc} , $V_{angGiro}$, $V_{angGiro}$, $V_{angCompas}$]	
Salida: n estados del sistema [X, Y, θ, V, ω]	
Datos: Modelo en ecuación 3 y función de medición en ecuación 1	
1 inicio	10 /* Actualización en el tiempo */
2 $\hat{x}_0^+ = E(x_0) \text{ y } P_0^+ = E[(x_0 - \hat{x}_0^+)(x_0 - \hat{x}_0^+)^T]$	11 $\hat{x}_k^{(i)} = f(x_{k-1}^{(i)}, u_k, t_k) \quad \hat{x}_k^- = \sum_{i=1}^{2n} W_i^{(m)} \cdot \hat{x}_k^{(i)}$
3 $W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L+\lambda)} \quad i = 1, \dots, 2L$	12 $P_k^- = \sum_{i=1}^{2n} W_i^{(c)} \cdot (\hat{x}_k^{(i)} - \hat{x}_k^-)(\hat{x}_k^{(i)} - \hat{x}_k^-)^T + Q_{k-1}$
4 $W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L+\lambda}$	/* Corrección con las mediciones */
5 $W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta)$	13 $\hat{y}_k^{(i)} = H(\hat{x}_k^{(i)}, t_k)$
6 para el instante actual k hacer	14 $\hat{y}_k = \sum_{i=1}^{2n} W_i^{(m)} \cdot \hat{y}_k^{(i)}$
/* Cálculo puntos sigma	15 $P_y = \sum_{i=1}^{2n} W_i^{(c)} \cdot (\hat{y}_k^{(i)} - \hat{y}_k)(\hat{y}_k^{(i)} - \hat{y}_k)^T + R_k$
7 $\hat{x}_{k-1}^+ = \hat{x}_{k-1}^+ + \hat{x}^{(i)}$	16 $P_{xy} = \sum_{i=1}^{2n} W_i^{(c)} \cdot (\hat{x}_k^{(i)} - \hat{x}_k^-)(\hat{y}_k^{(i)} - \hat{y}_k)^T \quad K_k = P_{xy} \cdot P_y^{-1}$
8 $\hat{x}^{(i)} = + \left(\sqrt{(L+\lambda)P_x} \right)_i \quad i = 1, \dots, L$	/* Estado actual */
9 $\hat{x}^{(i+1)} = - \left(\sqrt{(L+\lambda)P_x} \right)_{i-L} \quad i = L+1, \dots, 2L$	17 $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k(\hat{y}_k - \hat{y}_k)$
	18 $P_k^+ = P_k^- - K_k P_y K_k^T$

III. METODOLOGÍA

Se considera el modelo del sistema de cinco estados (ecuación 3), la navegación por punto descentralizado (algoritmo 1) y el filtro de Kalman Unscented como método de fusión sensorial (algoritmo 2), los cuales en conjunto forman el algoritmo de control del robot diferencial. Se considera una comparativa con el filtro EKF en las pruebas en MATLAB para verificar el adecuado funcionamiento del UKF. El algoritmo de punto descentralizado se encarga de seguir la trayectoria, pero en cada instante de tiempo el filtro Kalman funciona para mejorar la estimación de la postura del robot, al fusionar las mediciones y el estado anterior para corregir la estimación del estado actual; y estos datos son realimentados al algoritmo de navegación para que realice la estimación de la velocidad de referencia de las ruedas, con la información corregida, para seguir la trayectoria dada. De modo tal que, al considerar datos de una prueba real (Fig. 2a), y aplicación del método de fusión, se logrará mejorar la estimación. Para ello, se verifica la funcionalidad del filtro en MATLAB y con pruebas simuladas en Gazebo se valida este mismo.

Se emplean los parámetros de MATLAB mostrados en el Cuadro I considerando las ecuaciones 4 y 5 que corresponden a la matriz de covarianza del modelo y de las mediciones respectivamente. Note el parámetro Y3 el cual tiene un valor significativamente mayor a los demás, esto provoca que tenga un peso insignificante en la función sensorial. Entre menor sea el valor, mayor peso tendrá, como es el caso de Y4 que corresponde al giroscopio, el cual es el sensor más preciso con que se cuenta.

El proceso de ajuste de los parámetros, se realizó empíricamente y de forma iterativa siguiendo las recomendaciones establecidas en [3] hasta llegar a un ajuste adecuado. Primero se empezó a

realizar el ajuste considerando tres sensores, variando las matrices de covarianza hasta obtener el ajuste tal que la estimación del estado sea semejante al reportado por la cámara (medición considerada como ground truth), ahora se repite el proceso con cada sensor que se agregue, hasta llegar a la mejor estimación del estado posible.

CUADRO I
PARÁMETROS DE AJUSTE DE LAS MATRICES DE COVARIANZA DEL MODELO Y DE LAS MEDICIONES USADOS EN MATLAB Y ROS.

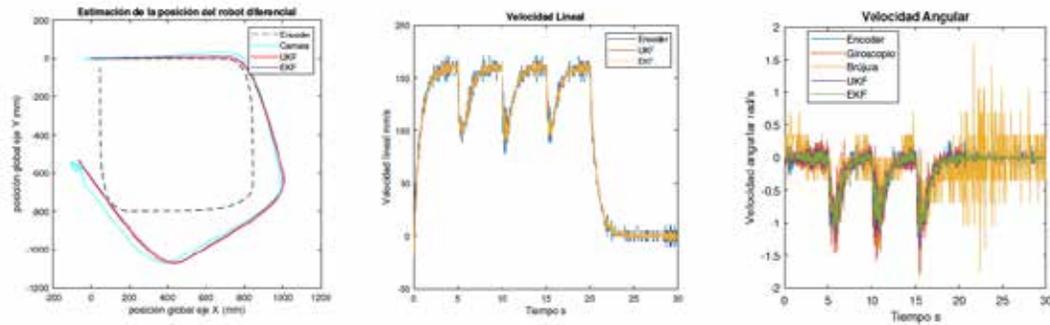
Filtro	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
UKF-MATLAB	0,001	0,001	0,01	0,001	0,0001
UKF-ROS	0,001	0,001	0,1	0,01	0,01
Filtro	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
UKF-MATLAB	0,0011	0,55	5×10^{10}	0,0012	0,035
UKF-ROS	0,001	0,001	0,1	0,3	$3 \times 10_{10}$

X: 1-PosX 2-PosY 3-Orientación 4-Vlin 5-Vang;
Y: 1-VlinEnc, 2-VangEnc, 3-VangGiro, 4-VangGiro, 5-VangCompas

Los algoritmos se prueban además en un entorno de simulación que permita avanzar a una futura implementación en plataformas reales. Para ello se migraron los códigos MATLAB a Python y ROS; se encuentra un modelo simulado equivalente, en este caso se utiliza el modelo diferencial de NEOBOTIX, MP-500 (Fig. 1b). Por lo tanto, es necesario reajustar los parámetros (ecuaciones 4 y 5). E igualmente, el valor Y_5 es significativamente mayor, de tal forma que sea insignificante para el método de fusión sensorial. Su implementación sigue los pasos anteriores, considerando los algoritmos 1 y 2, así como los valores de la Tabla 1 para la ecuación 5, sección ROS.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2a, 2b y 2c se observan los resultados obtenidos. Primero, en la Fig. 2a, se muestra la posición del robot estimada por el filtro UKF propuesto (línea roja), por el filtro EKF (línea morada) y la postura según las cámaras (línea celeste), se observa una mejora en la estimación de la postura y minimización del error dinámicamente, aunque siguen existiendo desviaciones entre la trayectoria real y la estimada; pero estas son considerablemente menores comparando con el resultado obtenido tomando en cuenta solo los *encoder* (línea negra a trazos). En las figuras 2b y 2c, se observa el filtrado y fusión de las mediciones de velocidad lineal y angular, respetivamente. Para este último, al considerar la matriz 5, el giroscopio y la brújula tienen un mayor aporte al estado de velocidad angular, debido a la magnitud relativa de los valores de la diagonal.



(a) Estimación de la postura del robot empleando UKF y EKF / (b) Estimación UKF y EKF de la velocidad Lineal / (c) Estimación UKF y EKF de la velocidad Angular

Fig. 2. Resultados de la fusión sensorial y mejora del cálculo de la postura

A. ÍNDICE DE DESEMPEÑO

Ahora, en cuanto al índice de desempeño (IAE) del UKF y EKF, estos se observan en el Cuadro II. Se obtiene para la estimación de la postura en el eje X y en el eje Y. El valor del IAE se obtiene de la ecuación de la nota 2 al pie de página, considerando el error como la diferencia de la postura estimada por el robot y la postura obtenida de las mediciones de la cámara, y se aproxima el valor mediante la aproximación de Euler, esto debido a la discretización de la ecuación continua del IAE⁸.

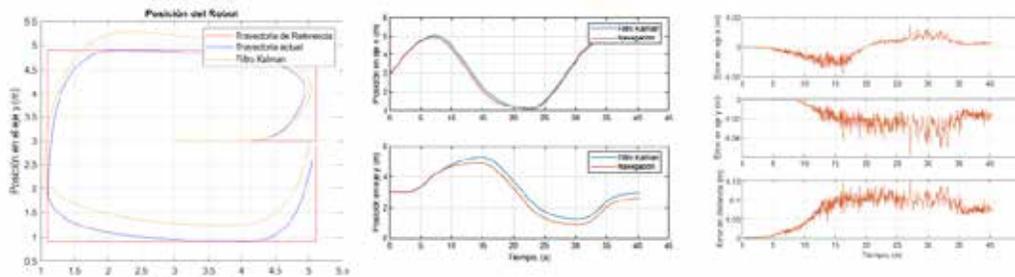
CUADRO II.
ÍNDICE DE DESEMPEÑO POR PLATAFORMA Y FILTRO IMPLEMENTADO

Plataforma	Filtro	IAEx	IAEy	IAEdist
Matlab	Sin filtro	2540	3315	20920
	EKF	578	568	4302
	UKF	567	577	4261
ROS	UKF /Círculo	6,4215	9,2495	60,2495
	UKF / Cuadrado	3,5498	11,5680	55,6378

Considerando los resultados del Cuadro II y de la Fig. 2, se observa que la estimación del estado del robot ha mejorado considerablemente y ahora la trayectoria que el robot calcula (línea roja) es más cercana a la real (línea celeste) medida por las cámaras. Y al realizar la comparación del índice de desempeño, se observa que tiene valores de un orden menor cuando se implementa el filtro, mostrando una mejora significativa en la estimación, siendo el UKF más preciso que el EKF en el IAE de distancia para las pruebas realizadas en MATLAB.

²IAE = $\int_0^{k \cdot T} e(\tau) \cdot d\tau = \sum_{i=0}^{k-1} e(i \cdot T_s) \cdot T_s$

Ahora se presentan los resultados de las simulaciones en Gazebo en la Fig. 3 únicamente para el UKF, considerando que existe ruido asociado a los instrumentos, en este caso no se cuenta con una brújula, por lo que se logra obtener una medición de la orientación del robot a partir de los datos del IMU, esto con la respectiva modificación de la matriz de medición H . Se considera una trayectoria objetivo de un cuadrado. De igual forma, se realiza un reajuste de los parámetros del filtro UKF para la prueba de trayectoria cuadrada, indicados en la Tabla 1. En este caso, se le da mayor peso a la odometría, y en la diagonal de la matriz R el valor de mayor magnitud indica que el quinto sensor agregado, tiene un efecto despreciable en la estimación de la postura del robot, por lo que agregarlo no afecta el cálculo de los demás estados.



(a) Prueba simulada en ROS siguiendo trayectoria de cuadrada, UKF / (b) Comparación de la posición estimada por el filtro y la trayectoria cuadrada de navegación, UKF / (c) Evolución del error del eje X, eje Y y distancia respecto al tiempo, trayectoria cuadrada, UKF Fig. 3: Resultados de la fusión sensorial para la trayectoria cuadrada y circular

De acuerdo con los resultados de la Fig. 3, las trayectorias que el robot sigue (línea azul) y la trayectoria que el robot calcula (línea amarilla) son bastante cercanas. Para verificar el comportamiento de la postura se considera las Fig. 3b para cada caso y se observa que la diferencia entre ambas trayectorias crece al inicio de la simulación, pero disminuye conforme pasa el tiempo, indicando que el filtro lo minimiza. Para comprobarlo, se obtuvo el comportamiento del error en el tiempo, en donde verifica que el filtro minimiza o estabiliza el error en la estimación de la trayectoria (Fig. 3c), ya que este es acotado y no crece indefinidamente.

B. Índice de desempeño, ROS

Una vez realizadas las pruebas, se obtiene el índice de desempeño de cada prueba con el objetivo de identificar la mejora en la estimación del estado, se observa en la Tabla 2. Considerando las figuras 3a - 3c, se observa un comportamiento similar que el que se dio con los datos reales y cálculos en MATLAB, es evidente una mejora en la estimación del estado y un error en el tiempo acotado. Considerando la Tabla 2, se observa que se tiene mejores resultados en el UKF que en el caso sin filtro. Entonces, la implementación del filtro mejora la estimación de la postura y para los parámetros mostrados tienen un mejor desempeño en una trayectoria cuadrada comparada, a una circular de dimensiones similares.

V. CONCLUSIONES

Se evidencia una mejora en la estimación de la postura con la implementación del filtro de Kalman Unscented, de acuerdo a la comparación de los índices de desempeño. Esto se logra al optimizar los parámetros de ajuste del filtro para un tipo de trayectoria, por lo tanto, puede que no sean los óptimos para las demás. Aunado a ello, el robot fue simulado con éxito en configuración diferencial en el entorno ROS-Gazebo, donde tiene movimiento autónomo, seguimiento de trayectoria y estimación de pose mejorada, incluso con sensores ruidosos, utilizando el filtro UKF. Y finalmente, la aproximación de la función de densidad de probabilidad resulta un mejor procedimiento que realizar una linealización del modelo no lineal del sistema en cada ciclo. Como trabajo futuro, se propone medir la cantidad de recursos computacionales que está consumiendo cada algoritmo en el simulador y en las plataformas disponibles en el laboratorio.

VI. 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.

VII. REFERENCIAS

- [1] V. F. Muñoz Martínez, < Planificación de trayectorias para robots móviles, > 1997.
- [2] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H^∞ and Nonlinear Approaches*. John Wiley & Sons, 2006, ISBN: 978-0-471-70858-2.
- [3] L. Marín, M. Vallés y M. Valera, < Localización De Robots Móviles De Recursos Limitados Basada En Fusión Sensorial Por Eventos, > Universidad Politécnica de Valencia, 2014.
- [4] A. Martinelli y RolandSiegwart, < Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot during Navigation, > en, 2003. DOI: 10.3929/ETHZ-A-010090637.
- [5] H. Chung, L. Ojeda y J. Borenstein, < Accurate mobile robot dead-reckoning with a precision-calibrated fiber-optic gyroscope, > *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, n.o 1, págs. 80-84, 2001. DOI: 10.1109/70.917085.
- [6] J. Yi, H. Wang, J. Zhang, D. Song, S. Jayasuriya y J. Liu, < Kinematic Modeling and Analysis of Skid-Steered Mobile Robots With Applications to Low-Cost Inertial-Measurement-Unit-Based Motion Estimation, > *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, n.o 5, págs. 1087-1097, oct. de 2009. DOI: 10.1109/tro. 2009.2026506.
- [7] F. Azizi y N. Houshangi, < Sensor integration for mobile robot position determination, > en *SMC'03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme - System Security and Assurance (Cat. No.03CH37483)*, IEEE, 2003. DOI: 10.1109/icsmc.2003. 1244564.
- [8] N. Houshangi y F. Azizi, < Accurate mobile robot position determination using unscented Kalman filter, > en *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2005., IEEE, 2005. DOI: 10.1109/ccece. 2005.1557061.

- [9] N. Houshangi y F. Azizi, < Mobile Robot Position Determination Using Data Integration of Odometry and Gyroscope.> en *2006 World Automation Congress*, IEEE, jul. de 2006. DOI: 10.1109/wac.2006.375994.
- [10] F. Azizi y N. Houshangi, < Mobile robot position determination using data from gyro and odometry.> en *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2004 (IEEE Cat. No.04CH37513)*, IEEE, 2004. DOI: 10.1109/ccece.2004.1345215.
- [11] B. Zhou, Y. Peng y J. Han, < UKF based estimation and tracking control of nonholonomic mobile robots with slipping.> en *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, IEEE, dic. de 2007. DOI: 10.1109/robio.2007.4522485.;
- [12] S.-i. Ko, J.-s. Choi y B.-h. Kim, < Performance Enhancement of Indoor Mobile Localization System using Unscented Kalman Filter.> en *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, IEEE, 2006. DOI: 10.1109/sice.2006.315573.
- [13] E. Wan y R. Van Der Merwe, < The unscented Kalman filter for nonlinear estimation.> *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium* (Cat. No.00EX373), DOI: 10.1109/asspcc.2000.882463.
- [14] Neobotix, *Mobile Robot MP-500*. dirección: <https://www.neobotix-robots.com/products/mobile-robots/mobile-robot-mp-500>.
- [15] Á. Valera, M. Vallés, L. Marín y P. Albertos, < Design and Implementation of Kalman Filters applied to Lego NXT based Robots.> *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, 1 ene. de 2011, ISSN: 14746670. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02799.
- [16] L. Marín, M. Vallés, Á. Soriano, Á. Valera y P. Albertos, < Event-Based Localization in Ackermann Steering Limited Resource Mobile Robots.> *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, n.o 4, págs. 1171-1182, 2014. DOI: 10.1109/TMECH.2013.2277271.
- [17] L. Marín, < Modular Open Hardware Omnidirectional Platform for Mobile Robot Research.> en *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/CCRA.2018.8588120.
- [18] L. Marín, M. Vallés, Á. Valera y P. Albertos, < Control de trayectorias en el robot móvil e-puck.> sep. de 2010.
- [19] R. Merwe y E. Wan, < The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation.> *2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings* (Cat. No.01CH37221), vol. 01, págs. 3461-3464, 2001. DOI: 10.1109/icassp.2001.940586.

Marco analítico para evaluaciones tecno-económicas y ambientales de políticas energéticas para el desarrollo sostenible

Framework for techno-economic and environmental evaluations of energy policies that advance sustainable development

Luis Victor-Gallardo

luis.victorgallardo@ucr.ac.cr

correo electrónico: School of Electrical Engineering, UCR

Mariana Rodríguez Arce

School of Electrical Engineering, UCR

correo electrónico: mariana.rodriguezarce@ucr.ac.cr

Ignacio Corrales Alfaro

School of Electrical Engineering, UCR

correo electrónico: ignacio.corralesalfaro@ucr.ac.cr

Jairo Quirós-Tortós

School of Electrical Engineering, UCR

correo electrónico: jairohumberto.quirós@ucr.ac.c

Palabras clave:

Mitigación del cambio climático, Política energética, Modelado de sistemas energéticos, Planificación energética a largo plazo, Objetivos de desarrollo sostenible

Keywords:

Climate change mitigation, Energy policy, Energy system modeling, Long-term energy planning, Sustainable developments goals.

I. ABSTRACT

Energy policies influence the production and living costs of firms and households in a country. New policies require investment and implementation effort. However, not all policy options have equal outcomes and can contribute differently to a country's development. This paper presents a framework to assess how an individual policy performs under economic and environmental criteria -costs and greenhouse gas emissions- and Sustainable Development Goal advancement. The assessment allows comparing policies with a long-term perspective and is applied to Costa Rica. We found that transport sector measures that reduce transport intensity -transport demand per unit of GDP- have the highest benefits and SDG advancement, e.g., modal shift to public

transport and passenger rail. However, penetration of zero- emission vehicles (ZEV) in private and freight transport will be necessary to reduce emissions considerably.

II. INTRODUCTION

Sustainable development goals (SDGs) are guidelines for public policy formulations because they seek to improve human well-being [1]. Energy policies can significantly impact achieving energy-related and social equality SDGs [2]. Hence, governments should promote energy policies with socially-wide benefits over a long-term planning horizon to avoid long-term failure, i.e., the policies that do not meet national goals [3]. Some studies focus on monitoring the current progress of SDGs [4], [5], while others focus on aligning other sectoral policies with the SDGs [6]. While a plethora of SDG-related works exists, to the best of the authors' knowledge, there is a gap in the literature with a practical case study that compares energy policies

quantitatively from a techno-economic and environmental perspective while catering to SDG advancement in Costa Rica. The country has been recognized for having considerable climate change mitigation ambitions, reflected in its National Decarbonization Plan [7] and its Nationally Determined Contribution (NDC) [8]. While the long-term implementation of the policies is uncertain, decarbonization will be economically beneficial [9]. However, complementary policies will be needed to advance implementation

[10] and meet other development goals, e.g., replacing fossil fuel tax revenue to ensure fiscal stability [11].

We fill the literature gap by developing a framework to assess energy policies and their SDG contribution. The framework ranks which energy policies benefit Costa Rica more under four criteria: countrywide economic benefits, emission reductions, cost effort, and SDG advancement. These metrics are estimated with a long-term energy model that quantifies costs and emissions across scenarios. SDG advancement is assessed qualitatively by determining the influence of an energy policy option over an SDG.

The paper is structured as follows. The methods section presents the framework and scenarios for the policy options. The results and discussion section presents the metrics of each scenario and ranks policies according to the metrics. Finally, the conclusion section recapitulates the findings and their relevance.

III. METHODS

This work's quantitative basis is an Open-Sourced Energy Modeling System (OSeMOSYS) model developed for Costa Rica [12]. OSeMOSYS allows calculating internally consistent technical and economic relationships between energy system elements through input-output ratios [13], [14]. The model in [12] runs until 2050 and includes the transport and electricity sectors; then, the work in [15] expanded the model to include the industrial sector using information from

[16], [17]. Fig.1 shows the resulting Reference Energy System (RES), which links primary or secondary energy sources to final energy consumption.

Table 1 shows the scenarios modeled in OSeMOSYS-CR. The scenarios are compared to a business-as-usual (BAU) scenario, developed in [12], which reflects a future energy system that resembles the present, but grows at 3% of GDP. The collection of policy options constitutes a National Decarbonization Plan (NDP) scenario, which is presented in [9], [12]. All scenarios -BAU, NDP⁹, and the ones in Table 1- share the same GDP growth assumptions but with differences that make costs and emissions vary. OSeMOSYS includes three costs per year and scenario: capital expenses (CAPEX), operational expenses (OPEX), and externalities. Table 1 also shows the association between policy options and NDC contributions.

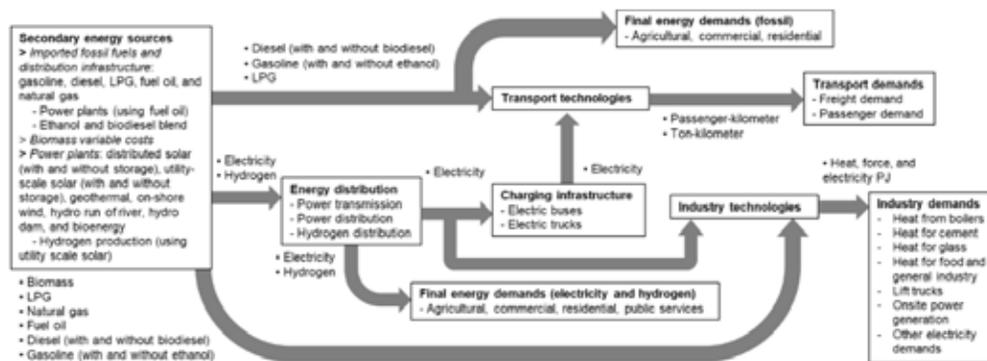


Fig 1. Energy supply chain modeled in OSeMOSYS-CR for this analysis. Taken from [15].

Equation 1 shows the economic benefits (EB) of a scenario (S) relative to a benchmark scenario (B); it reflects the avoided costs relative to a benchmark. Emission reductions (ER) are the difference in cumulative emissions between scenarios, as in Equation 2.

$$EB_S = CAPEX_B + OPEX_B + Externalities_B - CAPEX_S - OPEX_S - Externalities_S \quad (1)$$

$$ER_S = Cumulative Emissions_B - Cumulative Emissions_S \quad (2)$$

The investment and fixed costs (IFC) reflect the spending actors need to finance to transform the energy system, i.e., CAPEX and OPEX values per scenario. The benefits and costs are quantified in real terms in the future and can be normalized relative to future GDP.

9 The NDP scenario excludes changes to demand elasticity to GDP and changes to average distance driven.

CHART I
DESCRIPTION OF ENERGY POLICY OPTIONS AND CONTRIBUTION TO THE NDC.

	Policy option	NDC contribution	Description
1	Biofuels		Biodiesel: 1% by 2026 and 5% by 2030. Gasoline: 8% by 2022. We do not consider relative cost differences for biofuels.
2	Mode shift and passenger rail transport	1.1 1.5	50% of motorized passenger transport in 2050 10% of passenger transport in 2050
3	Freight rail	1.3	20% of heavy freight transport in 2050
4.a	Public ZEV penetration	1.4	30% in 2035 and 85% in 2050
4.b	(hydrogen -H2- for half the fleet)		
5	Private ZEV penetration	1.6 and 1.7	30% in 2035 and 95% in 2050.
6	Reduce freight elasticity to GDP	1.9	Decrease demand elasticity to GDP n 2030
7	Reduce elasticity to GDP	1.8	by 10%
8	Distances	2.2	Decrease the distances in 2050 by 10%
9	Renewable electricity system	3.1	100% renewable electricity by 2050
10	Commercial and residential LPG removal	3.2	Removes LGP by 2050
11	Industry decarbonization	3.3	Substitutes oil for biomass and electricity in 2050
12.a	Freight ZEV penetration	3.4	30% in 2035 and 85% in 2050
12.b	(hydrogen -H2- for half the fleet)		

The metrics per scenario can be normalized relative to the NDP scenario as in Equations 3 to 5 -as in [15]-, i.e., a scenario with the collection of measures applied simultaneously. The closer to a value of one, the higher the merit of the scenario for each metric. Equation 5 differs from the other normalization equations because the lower the cost, the more affordable and the higher the merit. Finally, Equation 6 sums each of the normalized measures with a distinct weight for each measure (W_{EB} for economic benefits, W_{ER} for emission reductions, and W_{IFC} for investment and fixed costs), resulting in the metric of merit (mm).

$$EB_{norm_s} = EB_s / EB_{NDP} \quad (3)$$

$$ER_{norms} = ERS / ER_{NDP} \quad (4)$$

$$IFC_{normr_s} = 1 - IFC_s / IFC_{NDP} \quad (5)$$

$$mm_s = W_{EB} EB_{norm_s} + W_{ER} ER_{norm_s} + W_{IFC} IFC_{norm_s} \quad (6)$$

We also assess whether a policy option from Table 1 advances any of the seventeen SDGs [18]. This assessment consists of judging whether the policy option supports achieving a given SDG’s targets: if the policy encourages achieving any of the targets, the policy benefits the goal.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The policy options (or measure groups, reflecting how other more specific measures would constitute the policy) have the performance presented in Fig. 2 per quantitative metric. Mode shift and passenger rail transport have the highest benefits but low emission reductions. The penetration of zero-emission vehicles will be necessary to attain high emission reductions, which also have considerable benefits and costs. The policies ranked across metrics are in Fig. 3: for Costa Rica, actions in private passenger and freight transport produce the highest avoided emissions and costs, i.e., benefits.

Reducing transport demand’s dependence on GDP growth -the elasticity of freight and passenger transport demand- will reduce total energy system costs. Hence, these measures appear in the top half of the economic ranking. Moreover, public transport ZEV penetration does not rank highly because of its relatively small size compared to the other transport components.

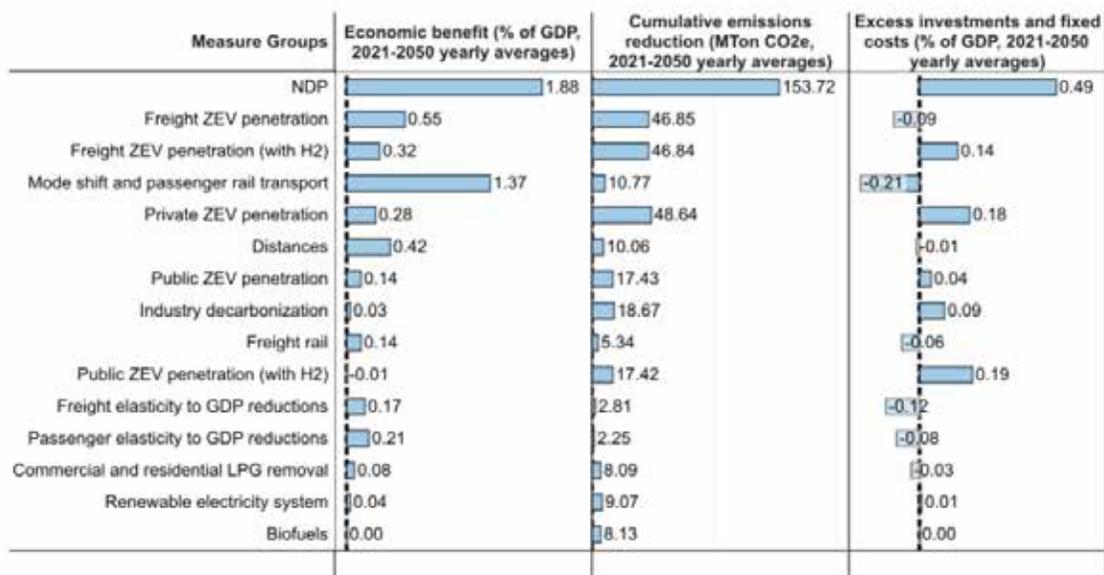


Fig 2. Techno-economic performance for every policy option.

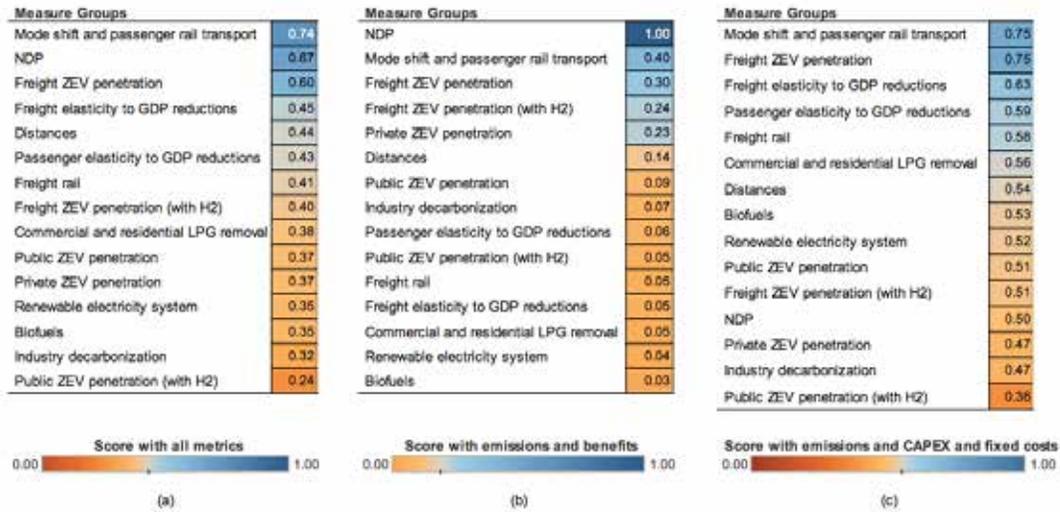


Fig 3. Ranking of policy options according to metric combinations. (a) All metrics. (b) Emissions and benefits. (c) Emissions and CAPEX and fixed costs. Taken from [15].

In Costa Rica, transport measures are the predominant energy policies because transport is the highest energy consumption component and emission source. Non-transport measures do not rank highly because of the lower contribution to emissions and countrywide expenses, e.g., biofuels would not impact the energy system as much as the other measures. Notably, industry decarbonization ranks highly for emission reductions but low for costs, pointing to the need to find cost-effective alternatives for the sector.

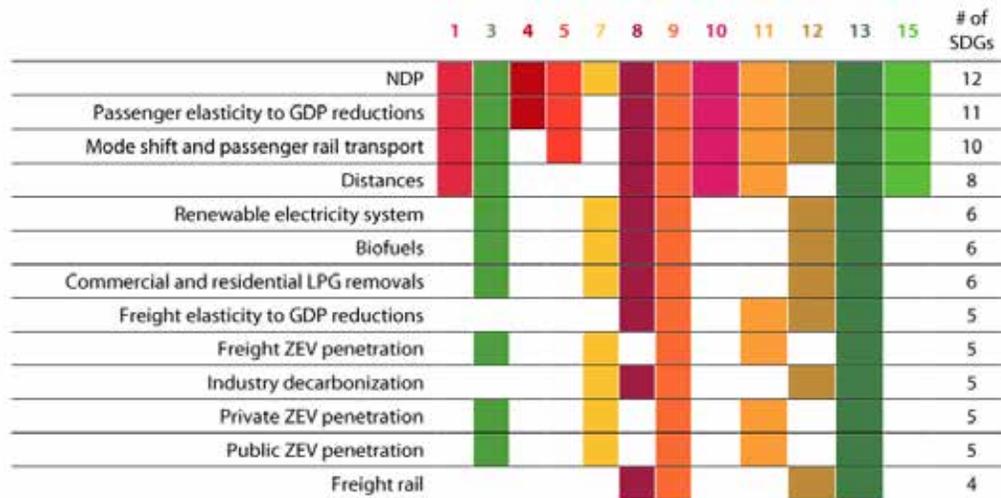


Fig. 4. Qualitative association between policy options and SDGs.

Figure 3 shows the association between policy options and SDG advancement. Crucially, mode shift to public transport and rail is the second measure that advances the most SDGs, behind the reduction of passenger demand elasticity to GDP. The transport-related measures are related

to a better quality of life for lower-income populations and less stress on resource extraction (i.e., 4, 5, 10, and 15), advancing SDGs that purely technological measures do not advance. Hence, the SDG analysis reinforces the prioritization of reducing the dependence on transport demand for GDP growth, which would translate into social benefits through achieving SDG targets. The considered measures do not advance goals 2, 6, 14, 16, and 17.

V. CONCLUSION

Costa Rica's NDC [8] mapped which SDGs will be advanced by specific mitigation measures across all greenhouse gas (GHG) emission sources. To increase the understanding of energy policy prioritization - inextricably linked to climate policy- we developed a framework to compare policy options, understood as a collection of measures that would have a tangible outcome in metrics of the energy system: national cost and emissions. The framework also considers the number of SDGs advanced per policy options. Hence, we contribute to the literature by providing an example of assessing energy policies with long-term impact; the assessment uses an open-sourced energy system techno-economic model.

The framework could appeal to decision-makers as input for formulating public policy and supporting projects with multiple development objectives. We found that transport sector measures that reduce transport intensity -transport demand per unit of GDP- have the highest benefits and SDG advancement, e.g., modal shift to public transport and passenger rail. However, the penetration of zero-emission vehicles (ZEV) in private and freight transport will be necessary to reduce emissions considerably.

Future work should focus on evaluating cost-effective alternatives for the industrial sector. Moreover, the modeling should assess how specific technologies or measures like 3D printing or the densification of urban spaces lead to reduced transport demand elasticities, thus impacting systemic energy efficiency. Finally, future work should quantify a measure's contribution to advancing SDGs, as explained in [19].

VI. REFERENCES

- [1] J. E. de Neve and J. D. Sachs, "The SDGs and human well-being: a global analysis of synergies, trade-offs, and regional differences," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-71916-9.
- [2] A. Gatto, "The energy futures we want: A research and policy agenda for energy transitions," *Energy Research and Social Science*, vol. 89. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2022. doi: 10.1016/j.erss.2022.102639.
- [3] M. M. Sokołowski and R. J. Heffron, "Defining and conceptualising energy policy failure: The when, where, why, and how," *Energy Policy*, vol. 161, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112745.
- [4] A. Miola and F. Schiltz, "Measuring sustainable development goals performance: How to monitor policy action in the 2030 Agenda implementation?," *Ecological Economics*, vol. 164, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ecolecon.2019.106373.
- [5] OECD, "Measuring Distance to the SDG Targets 2019: An Assessment of Where OECD Countries Stand," OECD, Paris, May 2019. doi: 10.1787/A8CAF3FA-EN.

- [6] P. Antwi-Agyei, A. J. Dougill, T. P. Agyekum, and L. C. Stringer, “Alignment between nationally determined contributions and the sustainable development goals for West Africa,” *Climate Policy*, vol. 18, no. 10, pp. 1296–1312, Nov. 2018, doi: 10.1080/14693062.2018.1431199.
- [7] Government of Costa Rica, “Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050,” San José, Costa Rica., 2019. [Online]. Available: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- [8] Government of Costa Rica, “Contribución Nacionalmente Determinada 2020,” 2020, [Online]. Available: [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Costa Rica First/Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica 2020 - Versión Completa.pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Costa%20Rica%20First/Contribucion%20Nacionalmente%20Determinada%20de%20Costa%20Rica%202020%20-%20Versi%C3%B3n%20Completa.pdf)
- [9] D. G. Groves *et al.*, “The Benefits and Costs Of Decarbonizing Costa Rica’s Economy: Informing the Implementation of Costa Rica’s National Decarbonization Plan under Uncertainty,” 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.18235/0002867>.
- [10] J. Quiros-Tortos, L. Victor-Gallardo, and L. Ochoa, “Electric Vehicles in Latin America: Slowly but Surely Toward a Clean Transport,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 7, no. 2, 2019, doi: 10.1109/MELE.2019.2908791.
- [11] M. Rodriguez, L. Victor-Gallardo, J. Quirós-Tortós, M. Jaramillo, and A. Vogt-Schilb, “Impacto fiscal de la descarbonización del transporte en Costa Rica y opciones de política para manejarlo,” Washington, 2021. doi: 10.18235/0003402.
- [12] G. Godínez-Zamora *et al.*, “Decarbonising the transport and energy sectors: Technical feasibility and socioeconomic impacts in Costa Rica,” *Energy Strategy Reviews*, vol. 32, 2020, doi: 10.1016/j.esr.2020.100573.
- [13] M. Howells *et al.*, “OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System. An introduction to its ethos, structure and development.,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 10, pp. 5850–5870, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.06.033.
- [14] M. Howells *et al.*, “Energy system analytics and good governance -U4RIA goals of Energy Modelling for Policy Support,” Mar. 2021, doi: 10.21203/RS.3.RS-311311/V1.
- [15] L. F. Victor Gallardo, “Robust energy system planning for decarbonization under technological uncertainty: From transport electrification to power system investments,” 2022. Accessed: Sep. 02, 2022. [Online]. Available: <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/87273>
- [16] Escuela de Ingeniería Eléctrica - Universidad de Costa Rica, “Estudio para la caracterización del consumo energético en el sector industrial,” 2019.
- [17] Escuela de Ingeniería Eléctrica - Universidad de Costa Rica, “Opciones de descarbonización del consumo energético en el sector industrial,” 2020.
- [18] “THE 17 GOALS | Sustainable Development.” <https://sdgs.un.org/goals> (accessed Jul. 14, 2022).
- [19] T. Niet, N. Arianpoo, K. Kuling, and A. S. Wright, “Embedding the United Nations sustainable development goals into energy systems analysis: expanding the food–energy– water nexus,” *Energy, Sustainability and Society*, vol. 11, no. 1. BioMed Central Ltd, Dec. 01, 2021. doi: 10.1186/s13705-020-00275-0.

Investigación en filtrado de señales de habla y su integración con docencia y acción social

Research on Speech Signal Filtering and its Integration with Teaching and Social Outreach

Marvin Coto Jiménez

Docente, Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica

correo electrónico: marvin.coto@ucr.ac.cr

0000-0002-6833-9938

Palabras clave:

Acción social, aprendizaje profundo, docencia, investigación, procesamiento de señales.

Keywords:

Social action, deep learning, teaching, research, signal processing.

I. INTRODUCCIÓN

Dentro del concepto de tecnologías del habla se identifican los diversos recursos y procesos que permiten el reconocimiento, análisis y comprensión de los sonidos que forman parte de la comunicación verbal. Al igual que otras áreas relacionadas con el procesamiento de señales, uno de los problemas inherentes en su desarrollo es la presencia de ruido no deseado en cualquiera de las etapas y procedimientos. En el presente trabajo se muestran los resultados de un proyecto de investigación en la Universidad de Costa Rica dedicado a filtrar ruido no deseado en señales de voz, en el contexto de tecnologías del habla. Para esto se presentaron diversas estrategias con las cuales abordar el problema, basándose principalmente en aprendizaje automático. Como parte del desarrollo de la investigación también se han involucrado proyectos de acción social y docencia, de manera que se plantea el desarrollo de este tipo de tecnologías como un punto de encuentro para la integración de las áreas sustantivas del quehacer de la Universidad de Costa Rica.

El uso de la voz constituye la forma más común y efectiva de comunicación entre las personas. Usando el habla, las personas hemos intercambiado pensamientos y todo tipo de información desde los comienzos de las civilizaciones, previo al desarrollo de los sistemas de escritura u otros sistemas de transmisión de comunicación. Desde la perspectiva del procesamiento de esta información, la voz es una señal de sonido, que es emitida por una persona, y se ve perturbada por ruidos cuando se propague en entornos reales [1].

La mejora de estas señales afectadas por el ruido es una necesidad para su adecuado aprovechamiento, y por lo que esto ha sido un objetivo perseguido desde hace décadas entre las personas investigadoras en el procesamiento de señales, y sigue siendo en la actualidad un problema

desafiante debido a la variedad de escenarios dinámicos y las múltiples posibilidades y combinaciones de ruidos presentes en el ambiente. Este proceso de mejora es de gran importancia para muchas aplicaciones, como las telecomunicaciones, los sistemas de reconocimiento automático de voz, y en general las tecnologías del habla [2], [3].

Estas últimas se refieren a las tecnologías desarrolladas con la finalidad de reconocer, analizar o producir señales de voz que puedan integrarse en sistemas de comunicación con personas. En cualquier proceso que involucra el habla, es deseable que las señales sean captadas, procesadas o producidas de la manera más limpia posible (es decir, con el menor nivel de ruido).

En el presente trabajo se muestran los resultados de la investigación seguida en años recientes para abordar el problema de eliminar el ruido en señales, en el contexto de tecnologías del habla. Dado que la investigación en esta área ha permitido establecer puentes con otros proyectos y unidades académicas, se destacará también su valor integrador de los ejes sustantivos de la Universidad de Costa Rica: docencia, investigación y acción social.

II. EL PROBLEMA DEL RUIDO EN SEÑALES DE HABLA

Las fuentes de ruido en la captura, procesamiento y generación de señales de voz son muy diversas. Entre ellas se encuentran: los sensores, los circuitos electrónicos, el entorno electromagnético, la baja calidad de acoples y los medios de propagación de las señales [4]. Las componentes de ruido que contaminan las señales pueden alterar significativamente las formas de onda registradas, con lo cual se pueden introducir errores en cualquiera de los procesos realizados con ellas.

Por esta razón surge el área de filtrado o mejora de señales de habla, con la cual se pretende estimar la señal de voz limpia, a partir de la señal de voz degradada. A lo largo de las décadas, se han propuesto múltiples algoritmos para obtener una estimación cercana a la señal limpia. Estos algoritmos se han propuesto tanto en el dominio del tiempo, como el de la frecuencia, o incluso dominios como el de wavelets.

Una de las formas más simples en que se puede modelar la presencia de ruido en una señal es estimándolo como un proceso aditivo, es decir

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{s}_t + \mathbf{n}_t, \quad (1)$$

donde \mathbf{y}_t es la señal registrada y con la cual se trabaja directamente, \mathbf{s}_t es la señal limpia, y \mathbf{n}_t es el ruido presente. Este tipo de modelos es útil en casos de ruido de fondo, como el que se registra en micrófonos que operan en ambientes reales.

La presencia de ruido puede afectar cualquiera de las líneas de interés de investigación en las tecnologías del habla, como se menciona en las siguientes subsecciones.

A. Análisis

El análisis de señales de habla es requerido en aplicaciones como la detección de actividad de voz (VAD, por las siglas en inglés de *Voice Activity Detection*), la detección de enfermedades como el Parkinson [5], condiciones psiquiátricas [6], entre otras posibilidades.

La presencia de ruido es un reto relevante para este tipo de aplicaciones, pues la relación entre el ruido y la señal por analizar puede llevar a que dos señales distintas sean imposibles de diferenciar. Esto puede surgir al momento de extraer del audio las características que se utilizan para los procesos de análisis, como características de intensidad, tono y espectro.

B. Reconocimiento El reconocimiento automático del habla es una de las áreas de investigación más dinámicas dentro de las tecnologías del habla. Consiste en transcribir el contenido lingüístico de una señal a partir del audio. Si bien se han logrado avances significativos en esta área, y las aplicaciones permean cada vez más la manera en que nos relacionamos con la tecnología, existen aún retos importantes, tales como eventuales ataques a los sistemas [7], y la presencia de ruidos de gran complejidad [8].

En estos casos, el ruido representa una condición diferente en la señal de habla con respecto a la que fue utilizada para ajustar los sistemas, por lo que su presencia constituye un elemento que es deseable eliminar antes de la utilización de los algoritmos de reconocimiento. El establecimiento de etapas previas a estos algoritmos es un propósito común dentro de esta área.

C. Síntesis

La síntesis de voz se refiere a la producción artificial de señales de habla. Dado que cada idioma y acento tiene sus particularidades, existe la necesidad de realizar investigación para cada condición particular, así como para la eventual transmisión de emociones, o la gran variedad de posibilidades de la expresión verbal.

Dado que en algunas de estas condiciones, idiomas o acentos, existe la posibilidad de no contar con datos ideales para su desarrollo (como lo son grabaciones suficientes y libres de ruido), existe un interés en eliminar el ruido presente en señales de habla para producir a partir de éste las voces artificiales [9], [10].

Con esta breve revisión se ha destacado la importancia que tiene la eliminación de ruido en las distintas áreas de las tecnologías del habla, y la razón por la cual se han desarrollado distintas estrategias en el marco de la investigación en la Universidad de Costa Rica, cuyos resultados se presentan a partir de la siguiente sección.

III. RESULTADOS DE LAS PROPUESTAS PARA EL FILTRADO DE SEÑALES BASADO EN APRENDIZAJE PROFUNDO

El aprendizaje profundo (o *deep learning* es un subconjunto de técnicas contenidas dentro del aprendizaje automático, las cuales permiten a las computadoras procesar información de una forma jerárquica [11]. Por lo general está basado en redes neuronales artificiales, que son conocidas por ser aproximadores de funciones universales utilizando el aprendizaje a partir de datos. Estos modelos matemáticos y computacionales que imitan el funcionamiento de las neuronas biológicas del cerebro cuentan con la capacidad de aprender operaciones y funciones complejas al construir las a partir de otras más simples.

La forma más común de aprendizaje profundo es mediante la composición de capas de unidades de redes neuronales artificiales. El primer nivel recibe los datos (en algunos casos, datos sin procesar) y las capas posteriores realizan otras transformaciones. Después de varias capas de este proceso, se pueden aprender funciones muy complejas, para procesos de clasificación o regresión.

En su aplicación en mejora de señales de habla con ruido, las redes neuronales artificiales aprenden una función de mapeo f entre el espectro de la señal ruidosa y_t y el espectro de la señal limpia s_t , con el criterio

$$\min \sum_{t=1}^T \|s_t - f(y_t)\|^2. \quad (2)$$

La señal limpia f es aproximada durante el proceso de entrenamiento a partir de los datos disponibles, y luego la red neuronal emite una versión de la señal sin ruido \hat{s}_2 sobre un conjunto de prueba. La intención es transformar la señal ruidosa en una forma lo más parecido posible al habla sin ruido, como se ilustra en la Figura 1

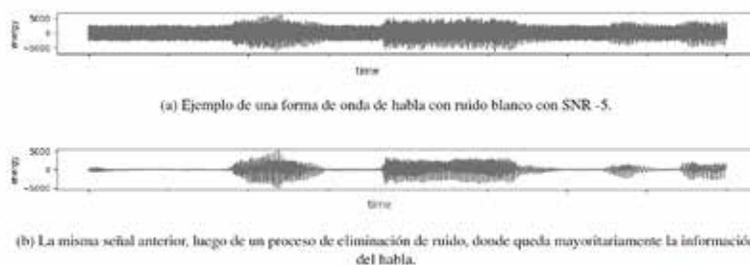


Fig. 1. Muestra de formas de onda de habla degradadas con ruido y luego de un efectivo proceso de filtrado.

En la investigación desarrollada en la Universidad de Costa Rica en los últimos años, el desarrollo de algoritmos para el filtrado de señales de habla contaminadas con ruido está basado en aprendizaje

profundo, con propuestas novedosas en tres direcciones principales: los enfoques híbridos, los selectivos y los basados en sistemas pre-entrenados, como se describen en las siguientes subsecciones

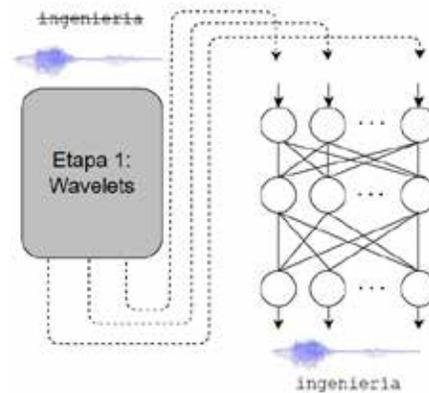


Fig. 2. Esquema del sistema híbrido

A. Enfoques híbridos

Los algoritmos híbridos se presentan como una combinación de dos o más aplicados sobre una misma señal, con la intención de agregar las ventajas de uno sobre el siguiente, semejante a un proceso en cascada. Esto se esquematiza en la Figura 2.

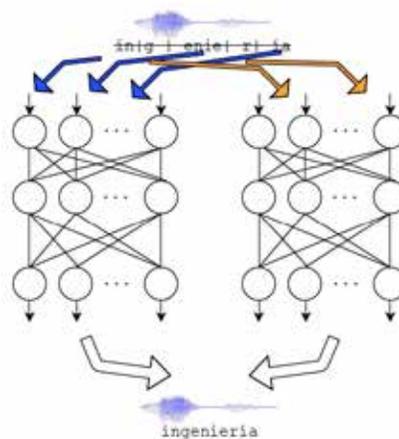


Fig. 3. Esquema del sistema selectivo

Los algoritmos desarrollados y presentados en [12], consideran segmentos de voz y , ruidosa y s , limpia para comparar la mejora usando wavelets, aprendizaje profundo y ambos métodos en cascada. El proceso de mejora mediante wavelets se puede resumir de la siguiente manera [13]: dados $W(\cdot)$ y $W^{-1}(\cdot)$, los operadores de transformación de ondas directa e inversa, y $D(\cdot, \lambda)$, el operador de eliminación de ruido con umbral λ , se siguen los pasos:

- Transformar $y(t)$ usando una wavelet: $Y = W(y(t))$.
- Obtener la versión sin ruido usando el umbral, en el dominio wavelet: $Z = D(Y, \lambda)$. Transformar la versión sin ruido en el dominio del tiempo: $s_1^{\sim} = W^{-1}(Z)$

En el enfoque híbrido, el primer paso de eliminación de ruido de wavelet proporciona s_1^{\sim} a las redes neuronales, que se entrenan con los criterios con el fin de obtener s_1^{\sim} , una mejor aproximación de s_1 que s_1^{\sim} y s_2^{\sim} .

Los resultados de esta propuesta mostraron un claro beneficio para la mejora de las señales degradadas con ruido artificial (ruido blanco y ruido rosa) utilizando métricas objetivas como la de percepción (PESQ) y relación señal a ruido segmental (SegSNR).

$$\min \sum_{t=1}^T \|s_t - f(\tilde{s}_t)\|^2, \quad (3)$$

B. Enfoque selectivo

Los algoritmos de mejora de señales degradadas con ruido usualmente se aplican sobre toda la onda, es decir, se pretende eliminar el ruido presente en cada segmento de la señal, independientemente de la naturaleza del sonido del segmento. Para el caso de mejora del habla artificial, se propuso en [14] la aplicación selectiva de redes neuronales artificiales de acuerdo con la naturaleza del sonido presente, usando dos categorías: sonidos vocálicos (como las vocales, <n>, <m> y <l>) y no vocálicos (como la <s>, <t>, <p>). El proceso se ilustra en la Figura 3.

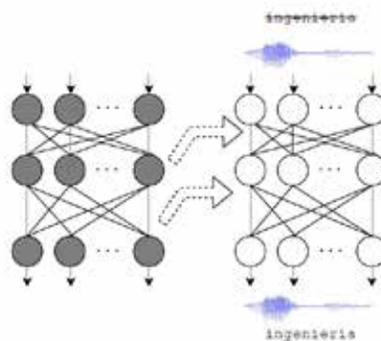


Fig. 4. Esquema del sistema preentrenado

De esta manera, con el entrenamiento se generan dos funciones, f_{21} y f_{22} , destinadas a mapear los parámetros en cada uno de los grupos de sonidos a los parámetros naturales correspondientes. Con éstas, fue posible obtener mejoras en la calidad de las voces artificiales, usando métricas como PESQ y SegSNR, las cuales fueron validadas como significativas utilizando pruebas estadísticas.

C. Enfoque basado en sistemas pre-entrenados

En la aplicación usual de redes neuronales artificiales, se parte de un estado inicial generado a partir de valores aleatorios de las conexiones internas con las cuales se aproximan las funciones de mapeo. Una de las posibilidades para mejorar la capacidad de las redes neuronales es la transferencia del conocimiento, es decir, la utilización de otras redes que han sido adecuadamente entrenadas en otros contextos, y aplicar en ellas los datos de entrenamiento con los que se dispone. El proceso se ilustra en la Figura 4.

Esta forma de aplicación equivale a utilizar una inicialización conveniente θ_A de todos los valores de la red neuronal artificial, los cuales son similares a las de θ_f (valores finales), cuando θ_A ha sido generado a partir de un problema equivalente a la eliminación de ruido.

En [15] y [16] se aplicaron estrategias de inicialización para mostrar que un punto de partida de las redes neuronales θ_A distinto a la inicialización aleatoria es más conveniente para los procesos de eliminación de ruido y procesamiento de las señales de habla. Los resultados fueron verificados a partir de medidas objetivas, y se constataron también en procesos de interés como la estimación de la frecuencia fundamental.

IV. INTEGRACIÓN DE ACTIVIDADES DE DOCENCIA Y ACCIÓN SOCIAL

El concretar tecnologías de manera que pueda verificarse en el corto plazo su beneficio a la sociedad requiere necesariamente la integración de equipos multidisciplinarios, dada la complejidad de los fenómenos sociales y de la participación activa de todas las personas y comunidades que pueden beneficiarse o impactarse con los desarrollos tecnológicos. Es por esto que de forma paralela al desarrollo de las investigaciones mencionadas en la sección anterior, se inició un acercamiento a otras áreas, con las cuales se han concretado proyectos tanto de docencia como de acción social, permeando así los tres ejes sustantivos de la actividad universitaria.

En cuanto a la acción social, la mejora de señales de habla degradadas ha encontrado un campo de aplicación en la mejora de la calidad de voces artificiales, especialmente de voces infantiles con acento costarricense. Con los proyectos ED-3416 y TCU-748, ambos planteados como tecnología para mejorar la calidad de vida de la población con discapacidad, se ha propiciado la participación de la comunidad estudiantil de la universidad, así como de la sociedad en general, para la sensibilización en el tema de derechos humanos, discapacidad y tecnología, y en la generación de bancos de voces infantiles con los cuales se puedan generar voces personalizadas para dispositivos de comunicación.

Aunado a este trabajo participativo y multidisciplinario, con los proyectos de docencia IE-869-2018 e IE-2185-2020, se han integrado a las aulas los esfuerzos de investigación y acción social, a partir de un diseño de materiales didácticos, y de motivación para la investigación en el estudiantado de la carrera de Ingeniería Eléctrica. De esta manera, el proceso de investigación se enriqueció no solamente con un sentido social de su aplicabilidad y de la integración de la visión propia del trabajo multidisciplinario, sino que parte del estudiantado profundizó sus

conocimientos en el tema de procesamiento de señales e inteligencia artificial, con lo cual aportó a la investigación y concretó estos conocimientos con publicaciones académicas. Todo esto se logró con una muy baja inversión, lo que permite ilustrar las capacidades de generar cambios positivos en la sociedad desde la academia en el área de ingeniería.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron los resultados de investigación en mejora de señales de habla degradadas con ruido aplicadas a tecnologías del habla. Los aportes principales se han dado en tres direcciones: la propuesta de un enfoque híbrido que combina wavelets y aprendizaje profundo, una propuesta de aplicación selectiva de filtros de aprendizaje profundo acorde con la naturaleza del segmento de habla (sonidos vocálicos o no vocálicos), y finalmente una propuesta que se basa en sistemas pre-entrenados para transferencia de conocimiento.

Si bien las propuestas fueron aplicadas en contextos diferentes para mostrar su eficacia a partir de medidas objetivas, una de los mejores posibilidades surge de la combinación de estas propuestas, ya que no son mutuamente excluyentes. Por ejemplo, se podría aplicar el pre-entrenamiento a cualquiera de las otras dos propuestas, y éstas a su vez podrían combinarse aplicando un enfoque selectivo-híbrido, usando wavelets y aprendizaje profundo en segmentos de habla de distinta naturaleza.

A pesar de que los resultados de la investigación en sí misma han constituido aportes al estado de la cuestión del problema de mejora de señales degradadas con ruido, una de las contribuciones adicionales que puede destacarse es la integración mostrado con actividades de docencia y acción social. Esto ha propiciado el trabajo profesional multidisciplinario dentro de la Universidad, y ha permeado el trabajo en las aulas, con lo cual se ha fomentado la investigación en el estudiantado y una visión humanista de la ingeniería eléctrica.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado con el apoyo de la Universidad de Costa Rica, proyecto de investigación 322-B9-105, proyectos de acción social ED-3416, TCU-748 y proyectos de docencia IE-869-2018 e IE-2185-2020.

VII. REFERENCIAS

- [1] L. Tan, Y. Chen y F. Wu, < Research on Speech Signal Denoising Algorithm Based on Wavelet Analysis,> en *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, vol. 1627, 2020, pág. 012 027.
- [2] G. Krishna, C. Tran, J. Yu y A. H. Tewfik, < Speech recognition with no speech or with noisy speech,> en *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, 2019, págs. 1090-1094.
- [3] M. Coto-Jimenez, J. Goddard-Close, L. Di Persia y H. L. Rufiner, < Hybrid speech enhancement with wiener filters and deep LSTM denoising autoencoders,> en *2018 IEEE International Work Conference on Bioinspired Intelligence (IWOBI)*, IEEE, 2018, págs. 1-8.

- [4] H. E. Rojas, H. D. Rojas y S. Cruz, < Reducción de Ruido en Señales Eléctricas Producidas por Descargas Parciales en Transformadores de Distribución Usando la Aproximación Local Polinomial (LPA) y la Intersección de Intervalos de Confianza (ICI).> *Información tecnológica*, vol. 30, n.o 5, págs. 161-172, 2019.
- [5] I. Martínez-Nicolás, T. E. Llorente, F. Martínez-Sánchez y J. J. G. Meilán, < Ten years of research on automatic voice and speech analysis of people with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: a systematic review article.> *Frontiers in Psychology*, vol. 12, pág. 620 251, 2021.
- [6] D. M. Low, K. H. Bentley y S. S. Ghosh, < Automated assessment of psychiatric disorders using speech: A systematic review.> *Laryngoscope Investigative Otolaryngology*, vol. 5, n.o 1, págs. 96-116, 2020.
- [7] H. Abdullah, K. Warren, V. Bindschaedler, N. Papernot y P. Traynor, < Sok: The faults in our asrs: An overview of attacks against automatic speech recognition and speaker identification systems.> en *2021 IEEE symposium on security and privacy (SP)*, IEEE, 2021, págs. 730-747.
- [8] K. Kinoshita, T. Ochiai, M. Delcroix y T. Nakatani, < Improving noise robust automatic speech recognition with single-channel time-domain enhancement network.> en *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, 2020, págs. 7009-7013.
- [9] N. Adiga, Y. Pantazis, V. Tsiaras e Y. Stylianou, < Speech Enhancement for Noise-Robust Speech Synthesis Using Wasserstein GAN.> en *INTERSPEECH*, 2019, págs. 1821-1825.
- [10] D. Dai, L. Chen, Y. Wang et al., < Noise robust tts for low resource speakers using pre-trained model and speech enhancement.> *arXiv preprint arXiv:2005.12531*, 2020.
- [11] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville e Y. Bengio, *Deep learning*. MIT press Cambridge, 2016, vol. 1.
- [12] M. Gutiérrez-Muñoz y M. Coto-Jiménez, < An Experimental Study on Speech Enhancement Based on a Combination of Wavelets and Deep Learning.> *Computation*, vol. 10, n.o 6, pág. 102, 2022.
- [13] S. G. Mihov, R. M. Ivanov y A. N. Popov, < Denoising speech signals by wavelet transform.> *Annual Journal Of Electronics*, n.o 6, págs. 2-5, 2009.
- [14] M. Coto-Jiménez, < Discriminative multi-stream postfilters based on deep learning for enhancing statistical parametric speech synthesis.> *Biomimetics*, vol. 6, n.o 1, pág. 12, 2021.
- [15] M. Coto-Jiménez, < Experimental study on transfer learning in denoising autoencoders for speech enhancement.> en *Mexican Conference on Pattern Recognition*, Springer, 2020, págs. 307-317.
- [16] M. Zeledón-Córdoba, J. Sánchez-Solis y M. Coto-Jiménez, < Reconstructing fundamental frequency from noisy speech using initialized autoencoders.> *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, n.o 10, págs. 1724-1731, 2020.

Algoritmo de clasificación de agentes de contraste exógenos usando imágenes de espectroscopía fotoacústica suave

Classification algorithm of exogenous contrast agents using smooth photoacoustic spectroscopy images

Karen Tovar Parra

Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

Diego Sayed Dumani Jarquín

*Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR
correo electrónico: diego.dumani@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Agentes de contraste, espectroscopía fotoacústica, clasificación, polinomios de Taylor, índice radiométrico

Keywords:

Contrast agents, photoacoustic spectroscopy, classification, Taylor polynomials, radiometric index.

I. RESUMEN

La espectroscopía fotoacústica se utiliza actualmente para detectar lesiones de forma no invasiva y enfermedades en lugares que las imágenes médicas convencionales no alcanzan con precisión, en esta técnica se utilizan agentes que reaccionan a diferentes longitudes de ondas y son inyectados en el cuerpo, sin embargo el organismo tiene cromóforos endógenos como la sangre oxigenada y desoxigenada, y estos cromóforos se mezclan con la señal del agente externo, lo que dificulta identificar la ubicación real del agente inyectado dentro del organismo. En esta investigación se diseñó e implementó un algoritmo para clasificar los cromóforos y localizar de forma acertada los agentes de interés. Esta clasificación permite automatizar técnicas convencionales para la prevención temprana de enfermedades, posibilitando generar potenciales resultados en menor tiempo y con una menor probabilidad de error humano.

II. INTRODUCCIÓN

La espectroscopía fotoacústica permite reconocer agentes cromóforos endógenos y exógenos del tejido [1]. Algunos agentes de contraste, como las nanopartículas de oro, tienen picos de absorción distintos que permiten la detección mediante una variedad de métodos de descomposición espectral [2]. Sin embargo, los métodos tradicionales pueden no distinguir los cromóforos endógenos, como la hemoglobina, de los agentes de contraste exógenos sin picos característicos y con una pendiente espectral similar. Por ejemplo, el análisis radiométrico (del inglés, *ratiometric*,

basado en razones) se ha utilizado para aproximar la presencia de nanoesferas de oro agregadas en los ganglios linfáticos [3].

El método radiométrico, aunque efectivo, tiene espacio para la optimización, incluida la selección de longitudes de onda específicas que pueden rechazar las señales del contraste endógeno mientras amplifica las señales de un agente de contraste en particular. Esto podría permitir generalizar el método para diferentes cromóforos y agentes. En la presente investigación, se propone un algoritmo automatizado para generalizar la clasificación de las señales e identificar las concentraciones relativas de cromóforos endógenos y agentes de contraste exógenos.

Siguiendo el enfoque de la técnica radiométrica, se propone un método analítico que busca convertir las señales en una función derivable para realizar un análisis de puntos de inflexión y monotonía a los datos, en donde se puede establecer un comportamiento diferenciador entre cada señal de absorción a partir de la longitud de onda. Con base en los resultados obtenidos de una señal experimental en el sistema de un individuo, se puede comparar dicha señal con los distintos valores teóricos de cada uno de los agentes y cromóforos de forma aislada, con el fin de encontrar el agente que más se asemeja en comportamiento a la señal experimental.

El análisis de máximos y mínimos permite obtener una tendencia de pendiente similar a la dirección del campo vectorial en cada espectro. Esto se puede traducir en una tendencia de comportamiento para cada cromóforo endógeno y para el agente utilizado, lo que permite una clasificación más general de los espectros. El análisis se puede replicar para analizar puntos separados en cada señal para determinar su comportamiento. A partir de dichos resultados individuales, se realiza la suma de todos los puntos analizados en una longitud de onda específica, para realizar la clasificación de componentes endógenos.

Este algoritmo ofrece una optimización al método fotoacústico radiométrico como mecanismo de clasificación de agentes de contraste exógenos, con el fin de identificarlos y clasificarlos a partir de un espectro uniforme, que de otro modo serían difíciles de detectar utilizando métodos espectroscópicos analíticos tradicionales manuales.

El objetivo de la presente investigación es generar un algoritmo generalizado para clasificar los agentes de contraste que se encuentren presentes en la imagen médica obtenida a partir espectroscopía fotoacústica. El estudio de los distintos procesos existentes de la espectroscopía fotoacústica para obtener las diferentes lecturas posibles, y la búsqueda de los agentes óptimos para las distintas variantes en la que se puede aplicar esta técnica [4] no están contemplados en el alcance de este trabajo.

III. MÉTODOS

En esta investigación se diseñó e implementó un algoritmo para realizar el reconocimiento y clasificación de las señales de interés. El algoritmo se divide en dos partes principales: el análisis y generación de la verdad fundamental, y la clasificación y reconocimiento de señales mezcladas.

A) Análisis y generación de la verdad fundamental

Existen datos sobre el comportamiento por separado que tienen algunos agentes fotoacústicos. En esta investigación se utilizaron los datos de tres agentes en específico: Hemoglobina oxigenada, hemoglobina desoxigenada y nanopartículas de oro [3], [5]. Sin embargo, se desconoce la función exacta que describen estas señales, por lo que en esta primera parte del algoritmo se trata a la señal como una función derivable para realizar un análisis de máximos y mínimos. Se obtienen las derivadas de las señales utilizando la serie de Taylor de la siguiente forma [6]:

$$f(x_{i+2}) = f(x_i) + 2h \frac{df(x_i)}{dx} + \sum_{n=2}^k \frac{1}{n!} (2h)^n \frac{d^n f(x_i)}{dx^n} \quad (1)$$

$$f(x_{i+1}) = f(x_i) + h \frac{df(x_i)}{dx} + \sum_{n=2}^k \frac{1}{n!} h^n \frac{d^n f(x_i)}{dx^n} \quad (2)$$

$$f(x_{i-1}) = f(x_i) + h \frac{df(x_i)}{dx} + \sum_{n=2}^k \frac{1}{n!} h^n \frac{d^n f(x_i)}{dx^n} \quad (3)$$

$$f(x_{i-2}) = f(x_i) + 2h \frac{df(x_i)}{dx} + \sum_{n=2}^k \frac{1}{n!} (2h)^n \frac{d^n f(x_i)}{dx^n} \quad (4)$$

Con $K = \text{longitud de onda máxima}$ de la muestra para (1),(2),(3) y (4) y despejando la derivada de $F(x_i)$ se obtiene

$$\frac{df(x_i)}{dx} = \frac{-f(x_{i+2}) + 8f(x_{i+1}) - 8f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{12h} + O(h^4) \quad (5)$$

Usando esa aproximación es posible encontrar el mínimo y el máximo globales que determinan un umbral diferenciador entre cada señal de absorción. Cuando la señal es creciente la derivada en un punto determinado es positiva, cuando la señal decrece su derivada es negativa. El algoritmo recorre la señal y detecta si existe un cambio de positivo a negativo, o viceversa; si es así, este es un punto de inflexión. Se utilizó un porcentaje de validación del 2%, esto quiere decir que para considerarse un punto de inflexión válido el cambio debe mantenerse durante al menos 2% de la señal, de esta forma se evita que pequeños picos de ruido se tomen en cuenta para la verdad fundamental. En esta línea, por ejemplo, la hemoglobina oxigenada puede tener puntos de inflexión en longitudes de onda de 680 nm y 920 nm, mientras que un agente específico puede tener puntos de inflexión en 700 nm, 820 nm, 890 nm y 950 nm, esto da más información sobre la señal y cómo cambia en un rango de longitud de onda.

A partir de los puntos de inflexión globales de la señal que se obtiene mediante aproximaciones de Taylor, el algoritmo cuenta con los segmentos de diferenciadores de la señal específica, se procede a calcular el índice radiométrico entre estos segmentos, lo cual permite saber que tanto crece o decrece en el rango de esas longitudes de onda donde se encontraron los puntos de inflexión. El índice radiométrico se calcula tomando dos puntos de inflexión de la señal, y dividiendo el valor de la señal en la longitud de onda menor entre el valor de la señal en la longitud de onda mayor. A partir de los índices obtenidos por el algoritmo, se determinaron tres posibles casos:

1.) Si el índice es menor a 1, la señal es creciente en ese segmento, entre más cercana a 0 está significa que crece más rápido, es decir una pendiente más inclinada.

2.) Si el índice es igual a 1, la señal es constante.

3.) Si el índice es mayor a 1, la señal decrece en esas longitudes de onda, entre mayor es mayor es la tasa de decrecimiento, esto es, una pendiente más inclinada, pero disminuyendo.

Con los puntos de inflexión globales y el índice radiométrico en ese segmento de longitudes de onda, se le da una tendencia a un cromóforo conocido en base a la señal que describe su comportamiento fuera del cuerpo, esto permite una clasificación más general de los espectros, que para fines de esta investigación se considera como la verdad fundamental. Esta parte del algoritmo solo se ejecuta una vez, los resultados obtenidos se guardan en archivos externos para ser utilizados en la segunda parte. Esto representa un ahorro en los recursos computacionales y en el tiempo de ejecución del algoritmo completo. El flujo general de la primera parte del algoritmo se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Flujo general del algoritmo creado para identificar monotonías de los diferentes espectros de los componentes o agentes analizados.

B) Clasificación y reconocimiento de señales mezcladas

La segunda parte del algoritmo se trabaja con datos experimentales como los que se obtienen de un procedimiento de obtención de imágenes fotoacústica. En estos datos se recibe directamente una sola señal en diferentes longitudes de onda por cada píxel de la imagen, esta señal es la suma de todos los agentes y cromóforos presentes, por lo que es una señal mezclada. Los datos se reciben como una matriz $N \times M \times L$ donde $N \times M$ es el tamaño de la imagen en píxeles, y la dimensión L representan las longitudes de onda. Para un solo píxel se puede tener varias longitudes de onda. Para esta investigación se utilizaron datos generados a través de MATLAB de imágenes 100×100 píxeles y con 15 longitudes de onda por píxel. Es decir, una matriz de $100 \times 100 \times 15$.

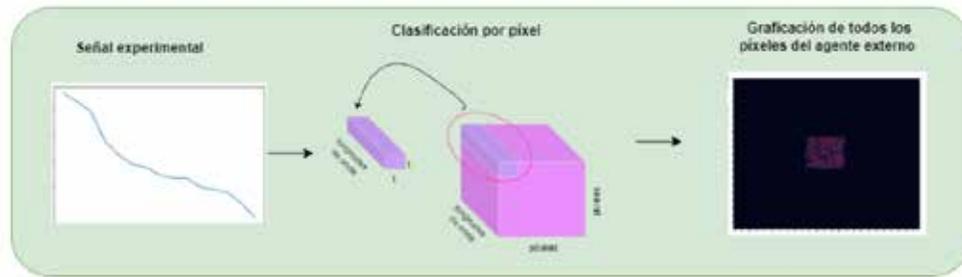


Fig. 2. Flujo del algoritmo para la graficación de todos los píxeles a partir de una señal experimental de un sujeto haciendo uso del flujo de la Fig. 1 para la clasificación de todos los agentes según el comportamiento de la señal.

Aquí, el algoritmo toma la matriz, y recorre los píxeles, en cada píxel realiza el proceso de reconocimiento y clasificación del píxel para determinar cuál es el componente que predomina más en ese píxel, esto lo hace utilizando la verdad fundamental que se calculó y almacenó en la primera parte del algoritmo, una vez que lee la información de la verdad fundamental de cada señal, el proceso de clasificación de cada píxel toma los siguientes pasos:

1. En una sola lista se obtienen todos los puntos de inflexión de las señales de la verdad fundamental.
2. Se toman dos de los puntos de inflexión de la lista y se calcula el índice radiométrico de la señal experimental.
3. Se crea una lista que contiene los puntos de inflexión y el respectivo índice radiométrico.
4. El comportamiento anterior se compara contra la verdad fundamental de cada señal que se obtuvo en la primera parte del algoritmo y se obtiene un índice de similitud en cada segmento de los puntos de inflexión.
5. Se clasifica el píxel según el índice de similitud que tiene respecto a cada señal de la verdad fundamental.

Luego de tener la clasificación por píxel, se grafica la matriz obtenida para cada cromóforo y puede visualizarse donde se encuentra la mayor cantidad del agente exógeno de interés.

IV. RESULTADOS

Para cada corrida del algoritmo con diferentes datos de entrada se obtuvieron tres imágenes generadas mediante un mapa de distribución que muestran la intensidad de los tres cromóforos por separado: 1) Hemoglobina Oxigenada (HbO₂), 2) Hemoglobina Desoxigenada (Hb) y 3) Nanopartículas de oro (AuNPs) [3]. Al obtener los resultados del algoritmo, que corresponde a tres matrices $N \times M \times L$, con N y M píxeles y L longitudes de onda, cada matriz corresponde a la concentración por píxel que existe por componente. De esta forma, se escoge una longitud de onda en específico para generar el mapa de distribución. A continuación, se presentan las imágenes generadas por el algoritmo contra las imágenes de verdad fundamental.

A) AuNPs con concentración individual en el centro (longitud de onda a 680nm):

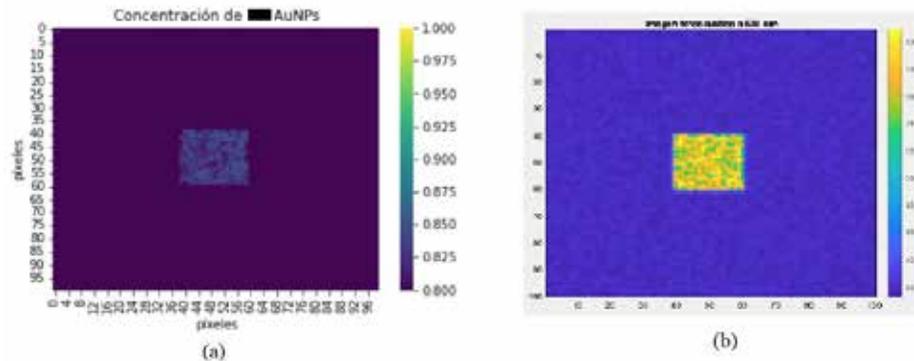


Fig. 3. (a) Lugar de la mayor concentración de AuNPs obtenida con el algoritmo (b) Lugar de la mayor concentración de AuNPs con la verdad fundamental.

B) AuNPs con tres concentraciones a lo largo de la imagen (longitud de onda a 680nm):

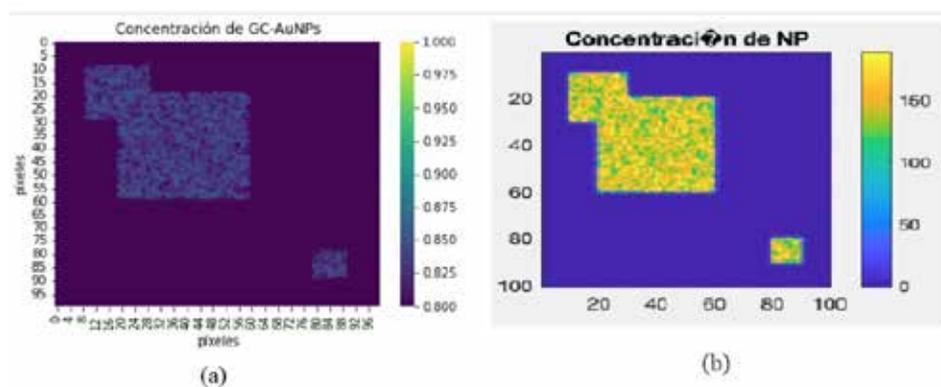


Fig. 4. (a) Lugares de la mayor concentración de AuNPs obtenida con el algoritmo (b) Lugares de la mayor concentración de AuNPs con la verdad fundamental.

V. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Puede observarse tanto en la Fig. 3, como en la Fig. 4 que los resultados obtenidos por el algoritmo se traducen en una localización acertada de la mayor concentración de los agentes, tanto como para el caso en que la concentración es única como para el caso en donde existen diferentes concentraciones a lo largo de la imagen. Puede notarse una diferencia importante en la escala de concentración, pues en la verdad fundamental de la Fig. 3 (b), fuera del rectángulo del centro no existen nanopartículas, es decir que tiene una concentración de 0, sin embargo Fig. 3 (a) el algoritmo sí detecta niveles de concentración fuera de la zona central, esto se dio en todas las corridas con datos diferentes, lo que indica que existe un umbral de validación para el algoritmo. En la Fig. 3 y Fig 4 se observa que el umbral es de 0.80 a 1, donde las zonas con menos concentración

tienen entre 0.80 y 0.85, mientras que la localización principal tiene valores mayores a 0.85, este es entonces el límite para considerar una concentración relevante versus una que debe ser descartada.

En general, el algoritmo demuestra una clasificación bastante aproximada de los cromóforos respecto a la verdad fundamental, especialmente en los casos en que se buscaba encontrar la localización del agente de interés externo AuNPs, el cual en las corridas efectuadas se situó en los lugares adecuados de la imagen y con el tamaño correcto comparado con las imágenes obtenidas de las verdades fundamentales.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Costa Rica mediante el proyecto de investigación C1464.

VII. REFERENCIAS

- [1] C. Lee, M. Jeon, y C. Kim, "Photoacoustic imaging in nanomedicine", *Applications of Nanoscience in Photomedicine*. Elsevier, pp. 31–47, 2015. doi: 10.1533/9781908818782.31.
- [2] Laufer, J., Delpy, D., Elwell, C., Beard, P. (2006). Quantitative spatially resolved measurement of tissue chromophore concentrations using photoacoustic spectroscopy: application to the measurement of blood oxygenation and haemoglobin concentration. *Physics in Medicine Biology*, 52(1), 141.
- [3] Dumani, D., Sun, I., Emelianov, S. (2017). In Vivo Photoacoustic Detection of Lymph Node Metastasis using Glycol-Chitosan-Coated Gold Nanoparticles. 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8091666.
- [4] R. C. García, 'Espectroscopia Fotoacústica: Una teoría antigua con nuevas aplicaciones', *Conciencia Tecnológica*, 2004.

Comparación de un control PID vs. lógica difusa para el manejo de terapia fototérmica no invasiva

Comparison between PID vs Fuzzy Logic controller to handle non-invasive photothermal therapy

Carlos Andrés Wattson Sánchez

Asistente de Investigación, Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica

Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

correo electrónico: carlos.wattson@ucr.ac.cr

0000-0001-6272-5259

Mauricio Céspedes Tenorio

Asistente de Investigación, Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica,

Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

correo electrónico: mauricio.cespedestenorio@ucr.ac.cr

0000-0003-3956-1633

Diego Sayed Dumani Jarquín

Profesor Asociado, Laboratorio de Investigación en Ingeniería Biomédica,

Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR

correo electrónico: diego.dumani@ucr.ac.cr

0000-0002-0086-4250

Palabras clave:

Cáncer, controlador, daño térmico, simulación de sistemas, terapia fototérmica.

Keywords:

Cancer, controller, thermal damage, systems simulation, photothermal therapy.

I. RESUMEN

Ante el aumento de casos nuevos y su elevada tasa de muertes, el cáncer se ha convertido en una de los principales causantes de defunciones en Costa Rica; por ello, se han desarrollado muchas técnicas para combatirlo, algunas de ellas efectivas pero otras muy agresivas para algunas poblaciones etarias, y ante tal necesidad es que nuevas tecnologías como la terapia fototérmica han venido a complementar los tratamientos actuales en busca de mejores resultados. Para maximizar los beneficios de este tipo de terapia, se pueden diseñar esquemas de control que busquen minimizar daños colaterales mientras se elimina el tejido no deseado. En este artículo, se propone una comparación entre dos tipos de controladores para el láser responsable de la terapia, donde se

busca llegar al máximo daño posible al tumor, salvaguardando la integridad del tejido sano cercano a la zona de aplicación.

II. INTRODUCCIÓN

Para el año 2020, el cáncer fue diagnosticado en cerca de 20 millones de personas en el mundo, y reporta casi 10 millones de defunciones anuales, convirtiéndolo, junto con la diabetes, los eventos cardíacos y en este periodo particular el covid-19, en los principales responsables de defunciones a nivel mundial. Costa Rica no escapa a la misma tónica, ya que según la información disponible, el cáncer sigue siendo uno de los eventos que más muertes causó en 2020 [1]-[3].

Dados los efectos secundarios y retos de las terapias convencionales, el área ingenieril se ha visto en necesidad de explorar en avances en el área médica que funcionen como medio para mejorar y complementar las terapias existentes. A raíz de esta necesidad surgen tecnologías emergentes como la terapia fototérmica, caracterizada por ser mínimamente invasiva, contar con la potencial ventaja de ofrecer una mejor selectividad del área de aplicación y secuelas menores en su uso [4].

La utilización de nuevas tecnologías trae complicaciones inherentes. Por ejemplo, para el caso de la terapia fototérmica, se debe controlar con precisión el área y la temperatura aplicada por el láser, pues se debe garantizar la muerte celular, pero temperaturas muy elevadas podrían producir carbonización de tejidos a los que ha sido aplicada la terapia. Otro reto en este tipo de terapia es que no es posible controlar la distribución de luz en el tejido, lo que puede causar que exista daño a tejido sano cercano a la zona de aplicación de la terapia [5], [6].

Con el fin de regular el funcionamiento del láser, se decidió complementar la terapia fototérmica con un control de lazo cerrado, el cual obtiene mediciones de temperatura en tiempo real como entrada, y con esto, calcula la potencia de salida del láser para maximizar el daño a los tejidos malignos, y su vez minimizar el daño al tejido sano circundante.

El objetivo principal del presente escrito, es comparar dos tipos de controladores diseñados para el manejo de terapia fototérmica. Específicamente, se diseñó un controlador de lógica difusa y un controlador PID con el fin descrito. Los controladores fueron evaluados en su respuesta temporal para identificar sus diferencias en desempeño, versatilidad y capacidades para el fin requerido.

III. MÉTODOS

A. Modelado del Sistema

Como fue mencionado en la Sección II, la temperatura en el tejido es determinante para conocer si se está realizando daño al tejido sano, y análogamente conocer el estado del tumor. Para ello se utiliza un sistema de medición de temperatura no-invasivo [7], pues es el encargado de dotar de información suficiente al controlador. Con dicha información, el controlador podrá modular

la potencia del láser, minimizando el daño térmico al tejido sano y procurando la destrucción completa del tumor. Gráficamente, se puede visualizar el modelo de trabajo en la Figura 1.

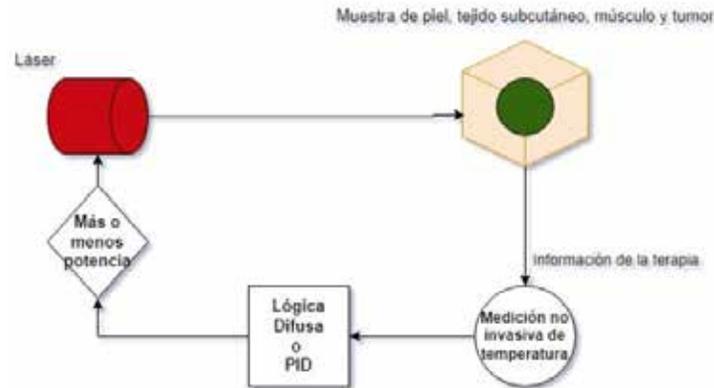


Fig. 1. Diagrama representativo del sistema de terapia fototérmica y su control.

El modelado del sistema, sus ecuaciones y los parámetros de la muestra sobre la que se trabaja, se encuentran descritas en trabajos anteriores [8]. En síntesis, se utilizará la ecuación de Arrhenius [9], [10], la cual cuantifica el daño térmico mediante la siguiente ecuación:

$$\zeta(x, y, z, t) = \int_0^{\tau} A \exp \left(-\frac{\Delta E_a}{R \cdot T(x, y, z, t)} \right) dt \quad (1)$$

En donde ζ simboliza el coeficiente de daño, A es el factor de frecuencia, ΔE_a es la energía de activación del proceso, mientras que T es la temperatura que se está aplicando y R es la constante del gas ideal. El coeficiente está definido desde un tiempo inicial 0, hasta un tiempo τ , donde se hace la medición acumulativa del daño, que se asume del cálculo de la ecuación 2, mostrada seguidamente:

$$P(x, y, z, t) = 100[1 - \exp(-\zeta(x, y, z, t))] \quad (2)$$

De la ecuación 2 será posible cuantificar el daño del tumor y tejido sano, aspecto indispensable para la toma de decisiones durante la terapia.

B. Controladores

Se debe representar al menos un modelo que sea capaz de replicar al proceso real; por ello la Planta $P(s)$ fue determinada para valores de 0-4 W, este rango es elegido porque es suficiente para lograr la temperatura deseada, pero puede ser calculado para más potencia si fuese necesario. Para

efectuar la linealización del sistema, se utilizaron cuatro áreas, una por cada Watt de potencia dado por el láser. Fue aplicado un escalón de una magnitud media según el área de trabajo y únicamente el área 1 (de 0 W, a 1 W) requirió un modelo diferenciado del resto de áreas de operación.

Posteriormente, se implementaron dos controladores, uno de Lógica Difusa siguiendo lo establecido en trabajos anteriores [8] y otro algoritmo de control para sistema *SISO*, entrada única-salida única, de tipo lazo cerrado, denominado PID. Para el diseño del PID se tuvo como variable controlada la temperatura de ablación (o la que se aplica durante la terapia) y como variable manipulada, la potencia del láser con la cual se produce la temperatura de interés.

Las plantas resultantes, contemplan una misma cantidad de ceros que de polos. Adicionalmente, la estabilidad del sistema depende mayoritariamente de la ubicación de los polos de la función de transferencia $FT(s)$ [11], y para este caso, se encuentran del lado negativo de la recta numérica, ayudando a garantizar la estabilidad del sistema.

Una vez realizado el estudio de las Plantas, que realizan la descripción matemática del comportamiento del sistema real, se procede a sintonizar los valores, con ayuda de la función *pidtune* disponible en MATLAB®, la cual recibe como parámetros la Planta $P(s)$ y el tipo de controlador que se desea obtener, y como consecuencia, se obtienen valores asignados de acuerdo a criterios como robustez y estabilidad [12]. Para este caso se dispuso de un controlador PID; sin embargo, cuando se obtuvieron las constantes sintonizadas, se encontró que la constante derivativa fue cero, por lo que realmente se consiguió un controlador de tipo PI.

Con los valores sintonizados, finalmente se procede a armar el sistema de lazo cerrado en Simulink, donde se coloca la referencia, el controlador PI ($C(s)$), la Planta ($P(s)$) y la salida del sistema ($Y(s)$). La representación descrita del sistema se coloca en la Figura 2.

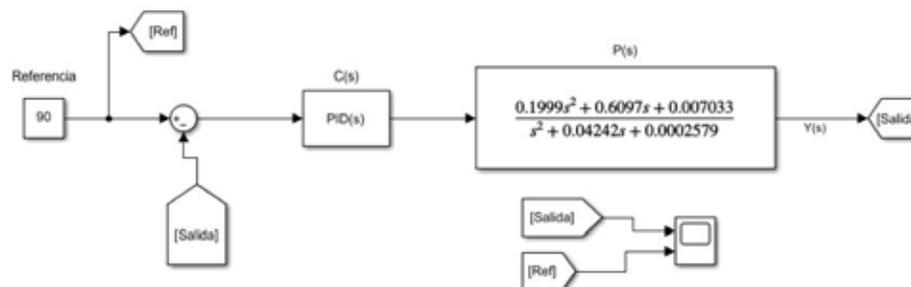


Fig. 2. Sistema de lazo cerrado para terapia fototérmica realizado en Simulink®.

Para el controlador basado en Lógica Difusa, se consideró para el modelo de inferencia Sugeno disponible en el Toolbox de Lógica Difusa™, encontrado en MATLAB®. Dicho sistema, basa su operación en tres entradas: estimaciones futuras del error en el daño térmico al tejido sano y en la temperatura máxima, y el error asociado al daño térmico del tejido cancerígeno. Dichas entradas componen tablas de la verdad con estados condicionales, que se relacionan de acuerdo a los parámetros (muy positivo, positivo, neutro, negativo o muy negativo) por medio de operadores

lógicos (OR, AND) para formar las reglas con las que se rige el actuar del controlador, cuya labor es el cambio de la potencia desplegada por el láser.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los comportamientos de cada controlador se evaluaron utilizando dos temperaturas meta distintas, para medir la respectiva potencia del láser en conjunto al daño del tejido sano y al tumor en cada caso. En la Figura 3, donde los puntos de operación son de 65 °C y 55 °C, se puede observar el comportamiento del daño al tumor. En los casos de 65 °C se logró el objetivo del daño máximo (100 %). El controlador PI culminó la terapia en 260 segundos, mientras que el controlador de Lógica Difusa alcanzó el daño total en 270 segundos. Para el caso de 55 °C, esta temperatura límite no permitió de culminar la terapia dentro del tiempo de simulación de 700 segundos; de acuerdo con las simulaciones, la terapia duraría aproximadamente el doble del tiempo dispuesto en la gráfica si se utiliza el límite de 55 °C.

Para 55 °C, a los 700 segundos el daño máximo alcanzado fue de 32.15 % por parte del controlador PI, y aproximadamente el mismo valor para el de lógica difusa. Ambos comportamientos durante este tiempo presentaron variaciones muy pequeñas y bajo este punto de operación la temperatura máxima alcanzada en el proceso fue de 55.48 °C, indicando un sobrepaso máximo de 0.87 %.

También se observa como, bajo las mismas temperaturas de operación, se obtienen respuestas muy similares entre los controladores; la diferencia general es que la temperatura meta de mayor magnitud pudo acabar con el tejido cancerígeno en menos de 4 minutos. Esto implica que ambos controladores tienen un error final de 0 % relativo al daño total en la zona deseada.

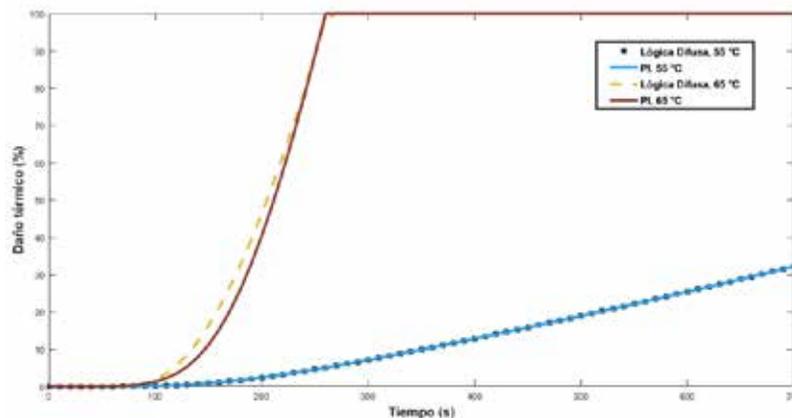


Fig. 3. Daño térmico al tumor en el tiempo, de acuerdo con los controladores de Lógica Difusa y PI para temperaturas meta de 55 y 65 °C.

Adicionalmente, uno de los objetivos del controlador es preservar el tejido sano cercano a la zona de aplicación de la terapia. La Figura 4 muestra como el controlador PID causó un daño

ligeramente menor al tejido sano, mientras que el controlador de Lógica Difusa presenta un daño máximo de 0.0642 %. Ambos valores se mantienen constantes en el tiempo una vez alcanzado el daño máximo, pues este valor no decrece aunque haya culminado la terapia, ya que se trata de daño acumulado en tejido.

En cuanto a los controladores con temperatura meta menor (55 °C), se comienza a dañar el tejido sano más tarde que cuando se utiliza un punto de operación superior; sin embargo, se desconoce el daño al tejido al final de la terapia pues sale del margen de tiempo simulado. Dado que las curvas mantienen una pendiente positiva, se puede inferir que el daño al tejido sano podría superar los valores que se obtuvieron con puntos de operación de temperatura mayor.

Esto puede explicarse debido a la dependencia del daño no solo en la temperatura sino en el tiempo de exposición. Además, al darse un proceso de calentamiento más lento, la difusión de calor desde el tejido maligno hacia tejidos sanos es mayor, por lo que podrían darse mayores daños al utilizar temperaturas menores. Esto evidencia la importancia del uso de sistemas de control que no se enfoquen solamente en una temperatura estática, sino en el daño térmico generado en las distintas zonas.

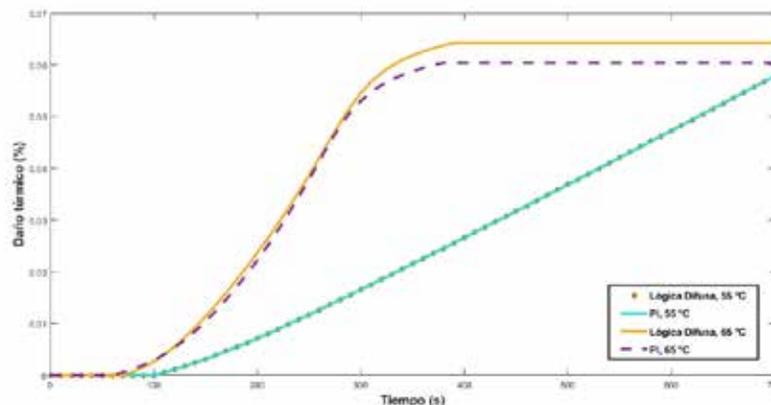


Fig. 4. Daño térmico al tejido sano en el tiempo, de acuerdo a los controladores de Lógica Difusa y PI para temperaturas meta de 55 y 65 °C.

Para finalizar esta sección se muestra en la Figura 5 la potencia entregada por el láser al asignar el punto de operación de 65 °C para ambos controladores. Al utilizar lógica difusa se observa un pico en la potencia de 1.6866 W, lo que causa que la temperatura en el tejido se eleve rápidamente y se optimice el daño térmico al tejido maligno. Por su lado, el PID mantiene una potencia relativamente más constante en el láser entre 1 W y 1.2 W.

Estas diferencias podrían ser relevantes según el hardware láser utilizado y las limitaciones que tenga el sistema en cuanto a variaciones en la potencia entregada.

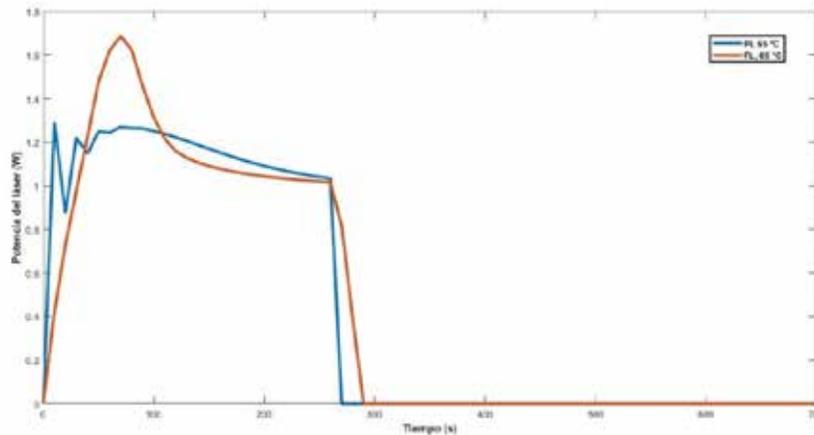


Fig. 5. Potencia en el tiempo, de acuerdo con los distintos controladores para temperatura meta de 65 °C

V. CONCLUSIONES

El controlador PI logró causar un daño ligeramente menor al tejido sano y un tiempo de finalización de la terapia ligeramente menor en comparación al controlador de Lógica Difusa. Sin embargo, ambos controladores lograron resultados virtualmente iguales. El PID mostró un sobrepaso mayor en las temperaturas alcanzadas, que tampoco resultó ser significativo en los daños generados.

El controlador de Lógica Difusa tiene en sus consideraciones de diseño el daño del tejido sano para cálculos futuros, por lo que no solo prioriza dañar por completo al tumor sino también mantener el daño al tejido sano debajo de un valor límite. Sin embargo, a pesar de no considerar esta restricción en sus parámetros, el controlador PI tuvo números equivalentes en lo que respecta al daño al tejido sano.

Se considera que el PI deberá ser analizado en distintos escenarios para determinar si es necesaria la restricción por daño térmico como se da en el controlador por lógica difusa. Desde un punto de vista general, la terapia demostró ser controlable por ambos algoritmos de manera satisfactoria.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Costa Rica mediante los proyectos de investigación C0232 y C1464.

VII. REFERENCIAS

- [1] J. Ferlay, M. Colombet, I. Soerjomataram, D. M. Parkin, M. Piñeros, A. Znaor y F. Bray, < Cancer statistics for the year 2020: An overview, > *International Journal of Cancer*, vol. 149, págs. 778-789, 4 ago. de 2021, ISSN: 10970215. DOI: 10.1002/ijc.33588.
- [2] WHO, *The top 10 causes of death*, dic. de 2020. dirección: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>.
- [3] INEC, *Defunciones 2020, Mortalidad general, materna, infantil, neonatal y fetal: Datos definitivos*. Feb. de 2022. dirección: <https://bit.ly/3uBp9WQ>.

- [4] D. Zhi, T. Yang, J. O'Hagan, S. Zhang y R. F. Donnelly, < Photothermal therapy,> *Journal of Controlled Release*, vol. 325, págs. 52-71, sep. de 2020, ISSN: 18734995. DOI: 10.1016/J.JCONREL.2020.06.032.
- [5] P. S. Yarmolenko, E. J. Moon, C. Landon, A. Manzoor, D. W. Hochman, B. L. Viglianti y M. W. Dewhirst, *Thresholds for thermal damage to normal tissues: An update*, jun. de 2011. DOI: 10.3109/02656736.2010. 534527.
- [6] R. Haghniaz, R. D. Umrani y K. M. Paknikar, < Temperature-dependent and time-dependent effects of hyperthermia mediated by dextran-coated La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃: In vitro studies,> *International Journal of Nanomedicine*, vol. 10, págs. 1609-1623, feb. de 2015, ISSN: 11782013. DOI: 10.2147/IJN.S78167.
- [7] J. Shah, S. Park, S. Aglyamov, T. Larson, L. Ma, K. Sokolov, K. Johnston, T. Milner y S. Y. Emelianov, < Photoacoustic imaging and temperature measurement for photothermal cancer therapy,> *Journal of Bio- medical Optics*, vol. 13, pág. 034 024, 3 2008, ISSN: 10833668. DOI: 10.1117/1.2940362.
- [8] M. C. Tenorio y D. S. Dumani, < Multivariable Fuzzy Logic Controlled Photothermal Therapy,> *IFAC- PapersOnLine*, vol. 54, págs. 400-405, 15 ene. de 2021, ISSN: 2405-8963. DOI: 10.1016/J. IFACOL.2021. 10.289.
- [9] M. Jasin'ski, < Modelling of thermal damage in laser irradiated tissue,> *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics*, vol. 14, págs. 67-78, 4 dic. de 2015, ISSN: 22999965. DOI: 10.17512/jamcm. 2015.4.07.
- [10] F. Henriques, < Studies of thermal injury; the predictability and the significance of thermally induced rate processes leading to irreversible epidermal injury,> *Archives of pathology*, vol. 43, n.o 5, págs. 489-502, mayo de 1947, ISSN: 0361-7017. dirección: <http://europepmc.org/abstract/MED/20243514>.
- [11] J. D. Rojas Fernández y M. Espinoza Bolan̄os, < Modelado y análisis de sistemas lineales,> 2021.
- [12] MATLAB, *PID tuning algorithm for linear plant model*. dirección: [https://la.mathworks.com/help/control/ ref/lti.pidtune.html](https://la.mathworks.com/help/control/ref/lti.pidtune.html).

Sistema en tiempo real Hardware-in-the-Loop para pruebas de control de un páncreas artificial

Real-time Hardware-in-the-loop system for control tests for artificial pancreas

David Ricardo Porras Cordero

*Estudiante egresado de la Escuela de Ingeniería Eléctrica
correo electrónico: david.porrascordero@ucr.ac.cr*

José David Rojas Fernández

*Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica
correo electrónico: jose.rojasf@ucr.ac.cr
0000-0003-1176-9061*

Orlando Arrieta Orozco

*Investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería
correo electrónico: orlando.arrieta@ucr.ac.cr
0000-0002-4004-8573*

Ramon Vilanova Arbós

*Investigador Universitat Autònoma de Barcelona
correo electrónico: Ramon.Vilanova@uab.cat
0000-0002-8035-5199*

Palabras clave:

Control, HIL, páncreas artificial, simulación, sistemas en tiempo real.

Keywords:

Control, HIL, artificial pancreas, simulation, real-time systems.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo expone una implementación de una simulación hardware-in-the-Loop del sistema glucosa-insulina, con el fin de realizar pruebas de un dispositivo de páncreas artificial. Se logró la implementación en un MyRIO de un modelo que simulara de manera realista el sistema glucosa-insulina y se tomaron en cuenta los efectos del sensor de glucosa y la bomba de insulina. El modelo a su vez fue controlado en tiempo real mediante un controlador implementado en Arduino.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, en el 2014 un estimado de 422 millones de personas adultas padecían diabetes, lo que supone un aumento del doble de pacientes con respecto a 1980 [1].

El aumento de pacientes está asociado al incremento de factores de riesgo como el sedentarismo. La mayor tasa de crecimiento se observa en países en vías de desarrollo. Se estima además, que la diabetes causó 1,5 millones de muertes en el 2014 y 2,2 millones más fueron causadas por niveles anormales de azúcar en la sangre [1]. Como no hay datos claros del tipo de diabetes en cada paciente, no se tiene información de cuántos pacientes padecen qué tipo de diabetes, sin embargo, sí se sabe con certeza que la gran mayoría de pacientes tienen del tipo 2 [1].

El páncreas artificial es de los tratamientos para diabetes tipo 1 que más avance ha tenido en los últimos años. Al mismo tiempo presenta muchas oportunidades de mejora que se pueden explotar [2]. Este dispositivo, en su forma más simple, contiene un sensor de glucosa en sangre, una bomba de insulina y un controlador electrónico. Desde la década de 1960 se ha intentado automatizar la bomba de glucosa, esto ha desembocado en un dispositivo llamado páncreas artificial, que lo que hace es monitorear los niveles de glucosa y, en función de la medida, suministra insulina según sea necesario [2].

El páncreas artificial que actualmente se comercializa no es totalmente automatizado. El paciente debe suministrarle información como por ejemplo, el momento en que se come y cuántas calorías se ingiere, o cuándo se realiza actividad física, ya que estas dos actividades generan fluctuaciones considerables en los niveles de glucosa. Esto lleva a que en estos momentos existan diversos esfuerzos por automatizar totalmente el páncreas artificial [2].

Debido a lo poco práctico de realizar pruebas clínicas cada vez que se quiere mejorar el algoritmo de control del dispositivo, estos se prueban utilizando un modelo del sistema que describe la interacción entre la glucosa y la insulina [3]. Sin embargo para poder hacer las pruebas con los controladores reales, se suele utilizar la técnica de Hardware-in-the-Loop (HiL), de manera que se pueda contar con una manera de trabajar con las dinámicas reales sin necesidad de intervenir a un paciente [4].

El objetivo de este trabajo es lograr simular de manera realista el funcionamiento de un páncreas artificial conectado a un paciente. Para lograrlo se implementó un modelo realista del sistema de glucosa-insulina más la bomba y el sensor en un dispositivo capaz de resolver las ecuaciones diferenciales en tiempo real. Al mismo tiempo se implementó un controlador sencillo en un microcontrolador de bajo costo. Se encontró que el sistema funcionaba tal y como se esperaba y que los resultados de la prueba real eran consistentes con las simulaciones realizadas.

El resto del artículo está dividido de la siguiente manera: en la Sección III se muestran los principios básicos de la metodología HiL así como el modelo seleccionado para la realización del sistema glucosa-insulina. En la Sección IV se muestran los detalles del sistema implementado, así como la discusión de los resultados. Las conclusiones se presentan en la Sección V.

II. METODOLOGÍA

A. Hardware-in-the-Loop

Cuando se hace referencia al concepto de “Hardware in the Loop” (HiL), lo que se busca es simular un sistema mediante una representación matemática fiable, con la particularidad que, durante

la simulación este modelo debe hacer el cálculo de los estados y las salidas del sistema en tiempo real utilizando un dispositivo digital. Los datos obtenidos de esta simulación son convertidos en las señales necesarias para probar algún dispositivo de hardware real que se quiera evaluar, de manera que este dispositivo no pueda distinguir si está conectado al sistema real o a la simulación [5].

En un inicio, la metodología HiL se utilizó en el campo aeronáutico, en simuladores para pilotos. En su etapa más temprana las simulaciones se hacían en sistemas analógicos, posteriormente se hicieron digitales y luego en tiempo real. En la actualidad, manuales de control de instituciones como la NASA y la ECSS indican esta técnica como la última etapa de verificación y validación de un sistema [6]. Actualmente se utiliza en múltiples industrias y es tema de cada vez más investigaciones, como por ejemplo, en [7] se utiliza para probar sistemas de control en tractores de agricultura y en [8] se hace una evaluación de un sistema para probar ejes de vehículos. En ambos casos el procedimiento es similar a lo ya mencionado. Como se busca probar un hardware que es parte de un sistema más grande, primero se busca crear un modelo que represente de forma virtual el sistema físico sobre el cual se quiere hacer la prueba, teniendo en cuenta que las entradas y salidas sean iguales a la realidad para que el dispositivo de control se pueda probar en la simulación como si fuera el sistema real.

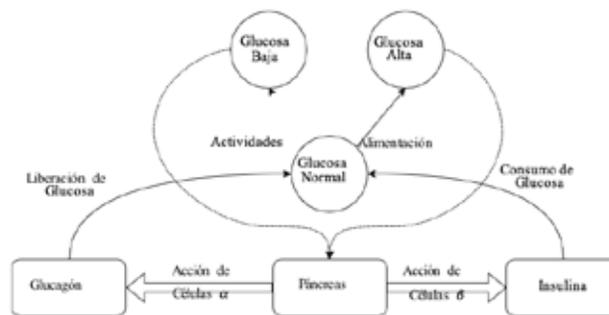


Fig. 1. Diagrama del sistema Glucosa-Insulina.

B. Modelo del sistema Glucosa-Insulina

Se puede decir que el páncreas funciona como un sistema de control lazo cerrado biológico. La cantidad normal de glucosa en la sangre se encuentra entre 70mg/dL y 110mg/dL . Si la cantidad de glucosa detectada en la sangre es más alta, se induce una reacción de las llamadas células β , que son las que generan insulina, la cual estimula el consumo de glucosa por las células, si más bien la cantidad de glucosa es baja, las llamadas células α liberan la hormona glucagón, que estimula al hígado para liberar glucosa en la sangre [9].

En la Fig. 1 se tiene una representación básica del sistema, donde, partiendo de un estado con niveles normales de glucosa, si se empieza a consumir alimento, el nivel de glucosa subirá, provocando una señal dirigida al páncreas que estimulará las células β para que produzcan insulina y se promueva el consumo de glucosa. De manera análoga, si se hace actividad física se producirá glucagón para producir glucosa porque los niveles de esta empezarán a bajar.

En la literatura existen varios modelos que intentan capturar el funcionamiento del sistema glucosa-insulina. Uno de los primeros fue el modelo mínimo de Bergman que se basa en la prueba intravenosa de tolerancia a la glucosa (IVGTT). Para modelar el sistema, este se dividió en dos subsistemas: uno para caracterizar el comportamiento de la glucosa y otro para el de la insulina. El primer subsistema es el segmento de la glucosa, este lo gobierna la insulina en plasma y de manera análoga, el otro subsistema es el segmento de la insulina y lo regula la glucosa en plasma [10].

Otro modelo muy utilizado es el de Hovorka [11], que divide la distribución, la eliminación y la producción endógena de glucosa en distintos submodelos, partiendo de los resultados de una prueba IVGTT marcada con glucosa enriquecida. Para el presente trabajo se decidió utilizar el modelo de Dalla Man y Cobelli [12], que asume que los subsistemas de glucosa e insulina están ligados por el efecto que tiene la insulina sobre la utilización y la producción endógena de glucosa [13]. El modelo y los parámetros obtenidos están pensados para personas sin diabetes o con tipo 2, pero con algunas modificaciones, puede describir también un paciente con tipo 1. Por restricciones de espacio, el modelo completo no se puede presentar en este artículo, pero se puede encontrar en la literatura [14]. Además del sistema como tal de glucosa e insulina, en el modelo que se implementó para el HiL, también se incluyó un modelo para los sensores y para la bomba de insulina, con el afán de hacer que el modelo total fuera lo más cercano a la realidad posible.

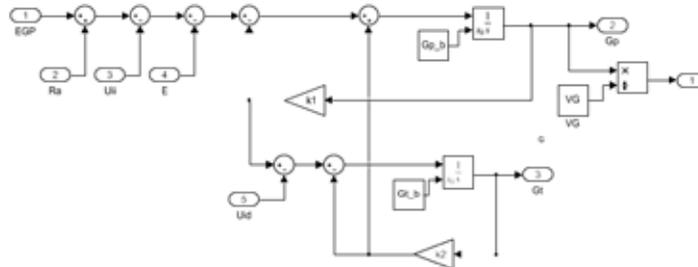


Fig. 2. Implementación del subsistema de glucosa en Simulink.

C. Plataforma de Simulación

Para realizar la implementación del modelo que comprende el sensor, la bomba, y la dinámica glucosa-insulina, se seleccionó el dispositivo *MyRIO* de *National Instruments*, debido a su capacidad de ejecutar órdenes en tiempo real, así como sus entradas y salidas integradas.

El controlador se implementó con una plataforma de desarrollo basada en el Arduino UNO. Esta ofrece la capacidad suficiente para programar un controlador simple basado en el algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo que funcione en tiempo real, así como entradas analógicas y digitales.

Dentro de los detalles que se tomaron en cuenta a la hora de ejecutar la simulación HiL, fue el tiempo de muestreo. Dado que el modelo seleccionado tiene sus constantes de tiempo y de transferencia medidas en minutos, se decidió que el *MyRIO*® resolviera el conjunto de ecuaciones

diferenciales que representa el sistema con un paso de integración de 500 ms, este tiempo fue seleccionada porque a esta velocidad funcionaba tanto para el *MyRIO* como para el *Arduino*.

Antes de realizar la simulación HiL, también se implementó el modelo en *MATLAB/Simulink*®, simplemente para tener una plataforma con la que sintonizar los controladores antes de hacer las pruebas con el sistema HiL. En la Fig. 2, se muestra el ejemplo de la implementación en Simulink, cuyo objetivo es calcular la señal de salida de glucosa, la cual va a depender de los valores de la producción endógena de glucosa (EGP), la tasa de aparición de glucosa por la comida (R_a), la utilización de glucosa tanto independiente (U_{ii}) como dependiente (U_{id}) de la insulina; y la extracción renal (E).

Para la prueba del modelo se ingresó un peso del paciente de 78 Kg, se simuló por 1400 min para obtener la simulación de un día completo y se ingresaron tres comidas, la primera de 35 g de glucosa a los 480 min, la segunda de 70 g a los 720 min, y la última también de 70 g a los 1200 min.

Comparando los gráficos que se muestran en [12] con los resultados de la simulación, se puede observar una diferencia en la magnitud de la tasa de aparición de glucosa. Esta diferencia provocada por la manera en que se simula la función impulso tiene su efecto ampliando las magnitudes de las demás señales de interés. A pesar de la diferencia mencionada, las otras señales se comportaron de manera similar por lo que se concluyó que el modelo estaba bien implementado en *MATLAB*®.

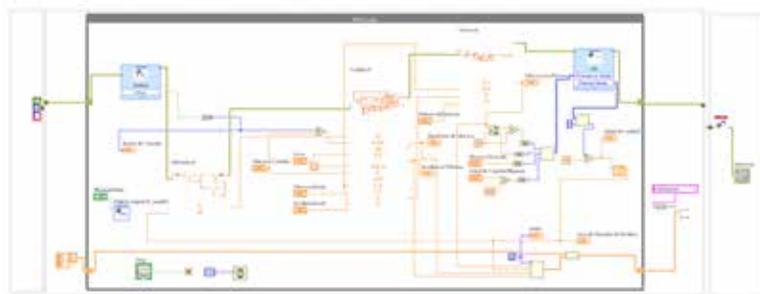


Fig. 3. Diagrama del programa principal en LabView para *MyRIO*.

III. RESULTADOS

A. Programa del *MyRIO*

El diagrama del modelo se introdujo en un programa para el *MyRIO* que incluyera además la comunicación con el controlador que se realizó con el *Arduino*. El diagrama completo del programa del *MyRIO* se tiene en la Fig. 3; en este programa se implementó la comunicación por medio del protocolo SPI, así como una salida digital que le indicara al *Arduino* el modo del controlador; también se implementó en el botón del *MyRIO* la señal impulso que indica la ingesta de comida.

Se optó por la comunicación SPI porque en la mayoría de proyectos investigados relacionados con páncreas artificial, la comunicación entre sensor y controlador se da mediante un protocolo serial,

sin embargo, no hay un consenso entre cuál protocolo usar, y en este caso, el que mejor realizó su función fue el SPI. Por otra parte, cada subsistema se configuró para que las ecuaciones diferenciales fueran resueltas mediante el algoritmo de Runge-Kutta, y que el paso de resolución sea de 1 s, lo que se traduciría a pasos de 1 min en el sistema real. Para lograr una simulación continua, los subsistemas de simulación se colocaron dentro de un ciclo “while”, el cual se ejecuta cada 100 ms.

B. Conexión del Sistema

Para conectar el sistema se utilizaron los canales SPI del MyRIO, así como del Arduino. Una de las ventajas proporcionadas por el *MyRIO* es que tiene incluida una resistencia de pull-up necesaria para establecer una comunicación SPI, por lo que no fue necesario incluir un resistor externo a la conexión.

Por otra parte se utilizó una salida digital del *MyRIO* para indicarle al Arduino si el controlador debía estar en modo manual o automático. Se debió tomar en cuenta que el *MyRIO* trabaja sus entradas y salidas lógicas a una tensión de 3,3V V mientras que el Arduino trabaja a 5 V sin embargo, en el Arduino aún se toma como positivo una señal de 3,3 V, y como esa señal digital sale del MyRIO hacia el Arduino, no se tuvo problema al implementar.

El diagrama con las conexiones hechas se tiene en la Fig. 4, en este diagrama se observa un costado del *MyRIO*, las conexiones se hicieron en el módulo A de pines del *MyRIO*. En la Fig. 5 se ve como queda conectado el *MyRIO* con el Arduino para realizar la simulación del sistema.



Fig. 4. Diagrama de conexiones entre el Arduino y el *MyRIO*.

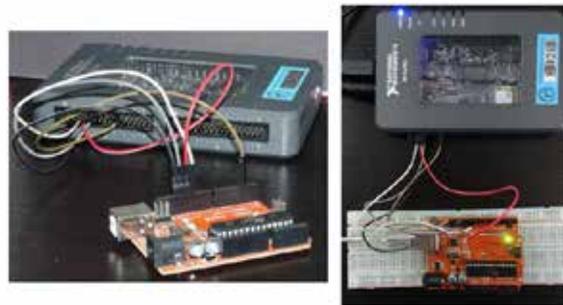


Fig. 5. Imagen del sistema implementado.

C. Prueba del sistema HiL

Se procedió a comparar los resultados del sistema HiL con la simulación en Simulink. En la Fig. 6, se probó un cambio del valor inicial de 180 mg/dL al valor deseado de 120 mg/dL. En este caso no hay datos de aparición de glucosa, por lo que solo se puede observar el tiempo que tarda en alcanzar el valor deseado, siendo este tiempo de aproximadamente 1500 min; este tiempo se consideró muy grande, pero considerando los niveles de glucosa nunca cayeron a niveles de hipoglucemia, a menos de 80 mg/dL, se considera que se hace un control adecuado en esta prueba.

La segunda comparación se realizó con perturbaciones, estas se hicieron para emular las tres comidas. Primero una ingesta de 4,5 g de glucosa aproximadamente a los 480 min, una de 7 g a los 720 min; para luego finalizar con una de 7 g a los 1200 min para una simulación de un día con tres comidas. Esta comparación se puede ver en la Fig. 7, y se puede notar la similitud entre las señales de Simulink y del *MyRIO*. Con las comparaciones de las Fig. 6 y Fig. 7 se obtuvo lo esperado ya que la simulación y la implementación del *MyRIO* con el Arduino como controlador se comportan de manera muy similar, con esto se concluyó que el modelo estaba correctamente implementado en el *MyRIO* y el controlador en el Arduino.

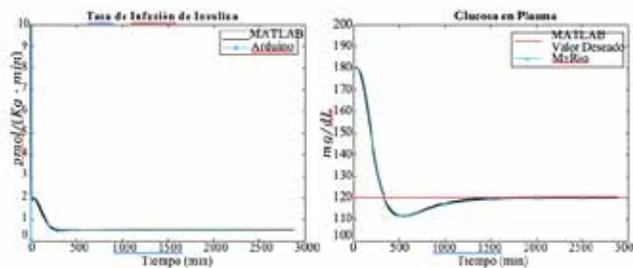


Fig. 6. Tiempo en alcanzar el valor deseado partiendo de 180 mg/dL de glucosa inicial.

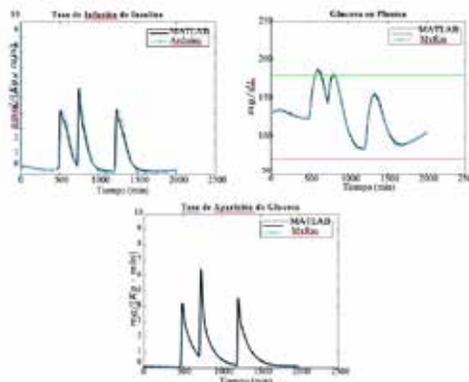


Fig. 7. Sistema ante tres perturbaciones partiendo de 130 mg/dL de glucosa inicial.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se creó un sistema HiL para probar algoritmos de control que eventualmente funcionaran en un páncreas artificial. Se logró encontrar y utilizar un modelo que considerara a la glucosa ingerida de manera oral, pasando por el sistema digestivo y además que la insulina ingresara mediante el espacio subcutáneo, con sus retrasos respectivos.

Los algoritmos de control utilizados en este tipo de sistemas son diversos y están en constante evolución, se utilizó PID porque todavía es tomado en cuenta en estudios de este tipo de simulaciones, pero se concluyó de acuerdo con la investigación bibliográfica hecha, no es el más eficiente para controlar el sistema, lo cual fue comprobado a la hora de realizar la simulación y observar tiempos de reacción considerablemente largos, aún así el controlador logró mantener el sistema fuera de límites peligrosos.

El dispositivo de National Instruments *MyRIO* resultó ser una herramienta eficiente para simular el sistema en tiempo real, con la facilidad de poder programarse desde *LabView*, y con sus entradas y salidas integradas.

Por otra parte el dispositivo tipo Arduino utilizado, a pesar ser menos potente a nivel de procesador y no tener tantas características tiene la ventaja de que no requiere ninguna licencia para ser utilizado, y sus capacidades fueron suficientes para manejar el control PID implementado.

Para futuros trabajos, se trabajará directamente en la optimización del algoritmo de control para esta plataforma, utilizando un controlador más próximo a lo que se utilizaría comercialmente.

V. REFERENCIAS

- [1] O. M. de la Salud, *Global Report on Diabetes*, Online, 2017.
- [2] B. Kovatchev, *A Century of Diabetes Technology: Signals, Models, and Artificial Pancreas Control*, jul. de 2019. DOI: 10.1016/j.tem.2019.04.008.
- [3] A. Cinar y K. Turksoy, *Advances in Artificial Pancreas Systems: Adaptive and Multivariable Predictive Control*. Springer Nature, 2018, ISBN: 9783319722443. dirección: <http://www.springer.com/series/10280>.
- [4] L. F. Quesada, J. D. Rojas, O. Arrieta y R. Vilanova, < Open-source low-cost Hardware-in-the-loop simulation platform for testing control strategies for artificial pancreas research,> en *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, Elsevier, ene. de 2019, págs. 275-280. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.06.074. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319301594><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896319301594>.
- [5] M. Cupelli, A. Riccobono, M. Mirz, M. Ferdowsi y A. Monti, < Hardware In the Loop Implementation and Challenges,> en *Modern Control of DC-Based Power Systems*, Elsevier, 2018, págs. 249-259. DOI: 10.1016/b978-0-12-813220-3.00007-7.
- [6] P. Sarhadi y S. Yousefpour, < State of the art: hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software,> *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 3, n.o 4, págs. 470-479, dic. de 2015, ISSN: 21952698. DOI: 10.1007/s40435-014-0108-3.
- [7] S. Raikwar, L. Jijabhau Wani, S. Arun Kumar y M. Sreenivasulu Rao, < Hardware-in-the-Loop test automation of embedded systems for agricultural tractors,> *Measurement: Journal of the International*

- Measurement Confederation*, vol. 133, págs. 271-280, feb. de 2019, ISSN: 02632241. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.10.014.
- [8] S. Olma, P. Traphöner, A. Kohlstedt, K. Jäcker y A. Trächtler, « Model-based Method for the Accuracy Analysis of Hardware-in-the-Loop Test Rigs for Mechatronic Vehicle Axles,» *Procedia Technology*, vol. 26, págs. 105-112, 2016, ISSN: 22120173. DOI: 10.1016/j.protcy.2016.08.015.
- [9] E. Friis-Jensen, « Modeling and Simulation of Glucose-Insulin Metabolism,» Tesis doct., Technical University of Denmark, 2007, ISBN: 9783527311439. DOI: 10.1002/9783527610600.ch3. dirección: www.imm.dtu.dk.
- [10] R. N. Bergman, L. S. Phillips y C. Cobelli, « Physiologic evaluation of factors controlling glucose tolerance in man. Measurement of insulin sensitivity and β -cell glucose sensitivity from the response to intravenous glucose,» *Journal of Clinical Investigation*, vol. 68, n.o 6, págs. 1456-1467, 1981, ISSN: 00219738. DOI: 10.1172/JCI110398.
- [11] R. Hovorka, F. Shojaee-Moradie, P. V. Carroll y col., « Partitioning glucose distribution/transport, disposal, and endogenous production during IVGTT,» *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*, vol. 282, n.o 5 45-5, 2002, ISSN: 01931849. DOI: 10.1152/ajpendo.00304.2001.
- [12] C. Dalla Man, D. M. Raimondo, R. A. Rizza y C. Cobelli, « GIM, simulation software of meal glucose-Insulin model,» *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 1, n.o 3, págs. 323-330, 2007, ISSN: 19322968. DOI: 10.1177/193229680700100303. dirección: www.journalofdst.org.
- [13] B. P. Kovatchev, M. Breton, C. Dalla Man y C. Cobelli, « In silico preclinical trials: A proof of concept in closed-loop control of type 1 diabetes,» en *Journal of Diabetes Science and Technology*, vol. 3, 2009, págs. 44-55. DOI: 10.1177/193229680900300106. dirección: www.journalofdst.org.
- [14] C. Dalla Man, R. A. Rizza y C. Cobelli, « Meal simulation model of the glucose-insulin system,» *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, n.o 10, págs. 1740-1749, oct. de 2007, ISSN: 00189294. DOI: 10.1109/TBME.2007.893506.

Parques Públicos Regionales, GAM, Costa Rica: patrones de uso y percepciones de personas usuarias

Regional public parks, GAM, Costa Rica: usage patterns and users' perceptions

Ing. Nidia Cruz Zúñiga¹⁰

*Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica
correo electrónico: nidia.cruz@ucr.ac.cr.
<https://orcid.org/0000-0002-4416-0626>*

Ing. Erick Centeno Mora¹¹

*Escuela de Ingeniería Civil Universidad de Costa Rica
correo electrónico: erick.centenomora@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-8806-0355>*

Arq. Karla Barrantes Chaves¹²

*Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica
correo electrónico: karla.barrantes@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0003-1554-6842>*

Palabras clave:

Áreas verdes, calidad de vida, parques regionales, parques urbanos, recreación.

Keywords:

Green areas, quality of life, regional parks, urban parks, recreation.

I. RESUMEN

La recreación es un derecho que permite garantizar una buena calidad de vida en las ciudades, en este sentido los parques regionales son una de las principales fuentes de esparcimiento, ocio y cultura. Dotar de estos espacios es un reto de planificación urbana y de gestión de la ciudad. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la funcionalidad de tres parques regionales del Gran Área Metropolitana de Costa Rica con base en los patrones de uso y la percepción de las personas usuarias, mediante un abordaje cuantitativo a través de consultas directas a la población usuaria. Los principales resultados evidencian la importancia de su uso y un amplio radio de influencia, que se

10 Master en Medio Ambiente, Maester en Evaluación de Proyectos, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Pedro Montes de Oca. nidia.cruz@ucr.ac.cr

11 Doctor en saneamiento, medio ambiente y recursos hídricos, Escuela de Ingeniería Civil Universidad de Costa Rica, San Pedro Montes de Oca. erick.centenomora@ucr.ac.cr

12 Doctora en planificación, Escuela de Ingeniería Topográfica, Universidad de Costa Rica, San Pedro Montes de Oca. karla.barrantes@ucr.ac.cr

relaciona con la accesibilidad y la infraestructura existente. Se destaca el uso del automóvil como uno de los medios más utilizados para llegar a estos espacios, incluso de quienes viven cerca. Se concluye que existe un reto importante para la ingeniería y la planificación urbana para integrar más exitosamente las necesidades de recreación al conglomerado urbano y especialmente al transporte público. Además, se requiere reforzar la administración de estos espacios para lograr una mejora de su calidad siempre bajo un esquema de gratuidad.

II. INTRODUCCIÓN

La provisión y vitalidad de los espacios públicos en la ciudad tiene un rol fundamental en la calidad de vida de las personas, en este sentido, los parques regionales, cuya escala es mayor a los parques barriales, favorecen el encuentro entre personas de diferentes comunidades, edades, estratos socioeconómicos y niveles educativos; se vuelven espacios de encuentro, intercambio y ocio. Para diferentes poblaciones estos

espacios cumplen múltiples funciones por lo que requieren ser seguros, limpios, accesibles y con condiciones óptimas para desarrollar actividades diversas. Por ello, es fundamental que estén articulados con la planificación urbana, especialmente con el transporte público y sistemas peatonales, para garantizar un disfrute más equitativo de diferentes grupos socioeconómicos y etarios. En la presente investigación se parte de una medición de aspectos subjetivos a través de un abordaje de percepciones, con el fin de evaluar la efectividad de los parques regionales existentes para cumplir con esa función de recreación para los habitantes del GAM (Gran Área Metropolitana). Se explora los patrones de uso de las personas usuarias de los tres parques regionales administrados en el momento de la investigación por el Instituto Costarricense del Deporte y la Recreación (ICODER): el Parque La Sabana, Parque de La Paz y Parque del Este. En el material complementario al final del artículo puede visualizar un mapa de ubicación de los parques estudiados. El propósito del trabajo es establecer relaciones entre factores demográficos con patrones de uso, y niveles de satisfacción.

III. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

El GAM enfrenta muchos retos asociados a una escasa planificación urbana sostenible. Según investigaciones del Estado de la Nación, el Valle Central es producto de una conurbación urbana en los últimos 30 años con enormes problemas de movilidad [1], sin integración al sistema de transporte y generando dependencia de vehículos privados [2]. A esto se suman nuevos patrones de urbanización (grandes condominios) que incrementan el área urbanizada pero no así la dotación de espacios públicos para la recreación de la comunidad.

El derecho a la recreación ha sido poco abordado en los marcos legales latinoamericanos, y no se han articulado las políticas públicas de las instituciones [3]. En este sentido toda persona deberá tener la oportunidad de contar con espacios óptimos para recrearse, para el deporte y la cultura. Expertos en el tema han definido el concepto de recreación como un proceso a través del cual el ser humano logra modificaciones en su forma de ser, obrar, pensar y sentir [4]. La recreación puede

aportar a la calidad de vida, según Bolívar [5] esta última se puede plantear como la medición del bienestar y satisfacción de las personas. La vitalidad del espacio público tiene un rol primordial en la percepción de la ciudad. En este sentido, Borja y Muxí [6] señalan que la ciudad debe entenderse como un sistema compuesto por los espacios abiertos, redes de transporte y usos del suelo. En este sentido, los parques regionales contribuyen favorecen el encuentro entre personas de diferentes lugares, edades, estratos y niveles educativos.

Varios autores relacionan el aprovechamiento de espacios verdes públicos con el bienestar de las personas ([7], [8]). Estudios previos han demostrado como la naturaleza contribuye a la purificación del aire, filtración del viento, amortiguamiento del ruido y estabilización de microclimas, además cumplen funciones sociales y psicológicas [7] y contribuyen a la salud mental, y mejoran el estado físico en general [9]. Así mismo, la percepción sobre el parque (facilidades, iluminación, mantenimiento y diseño), son factores claves y que según algunos autores conforma una accesibilidad percibida [10]. Dwiputra, Tampubolon y Kusuma [11] sugieren que los tres factores más importantes en la compatibilidad de una persona con un parque urbano son: ubicación, ambiente natural y calidad del diseño. Un estudio encontró que el nivel de cercanía y la satisfacción no necesariamente cumplen una relación lineal, pues personas que viven inmediatamente junto al parque regional experimentan ventajas, pero también externalidades (alto tráfico), por lo que concluyen que distancias moderadas de alrededor de 332 metros generan un mayor nivel de satisfacción [12]; otras investigaciones señalan que dicha distancia no debería exceder los 800 metros [10]. De Magalhaes y Carmona [13] señalan que la gobernanza de los espacios públicos corresponden a la articulación entre demandas y aspiraciones sociales y su materialización, para lo cual es necesario considerar: regulación de usos del suelo, inversión y financiamiento, mantenimiento y administración. Para el caso costarricense, el GAM presenta una carencia de parques, en gran medida por una débil gestión territorial de los municipios [14]. Como resultado de ello, es común el surgimiento de áreas de recreación improvisadas, pues las ofertas para el ocio son casi nulas o privadas.

IV. METODOLOGÍA

Se contempló un análisis cuantitativo. La recolección de datos se llevó a cabo mediante encuestas a personas usuarias en diferentes días y horarios. El levantamiento de información primaria se realizó entre 2018 y 2019, con colaboración de estudiantes de trabajo comunal universitario de la Universidad de Costa Rica (UCR). No se conocen datos de la población total que utiliza estos parques, pues a excepción del Parque del Este, los otros son de acceso libre y no se llevan estadísticas de visitación. Por ello, no se pudo estimar estadísticamente un tamaño de muestra, sino que se trató de alcanzar una cantidad de encuestas que permitiera obtener variabilidad de respuestas. En total se realizaron 491 encuestas efectivas en los tres parques evaluados. Las personas participantes se seleccionaron aleatoriamente. Para la recolección de los datos se utilizó un cuestionario digital (Typeforms) que las personas encuestadoras llenaron con su aparato celular personal. El cuestionario constó de 17 preguntas cerradas de selección única o múltiple, y la duración de la encuesta era de entre 5 a 15 minutos. Estas preguntas levantaron información general sobre la persona encuestada (sexo, edad,

lugar de residencia), así como información específica sobre las percepciones y patrones de uso del parque. El cuestionario fue validado en una población piloto de estudiantes de la UCR. En la Tabla 1 se presenta la composición de la muestra alcanzada.

El análisis de los datos se llevó a cabo mediante métodos de estadística descriptiva (tablas, gráficos) utilizando Excel e inferenciales (pruebas de hipótesis), mediante Statistica 10 [15]; esta última se utilizó para analizar la relación de distintas variables del estudio mediante pruebas de independencia (test de Chi-cuadrado (χ^2) de contingencia con un nivel de significancia (α) de 5 %).

CUADRO I.
CARACTERÍSTICAS DE SEXO Y RANGO ETARIO PARA LAS PERSONAS ENTREVISTADAS

Parque / Sexo	Rango etario					Total general
	Menor de edad	18- 30	31 – 40	41 – 50	Mayor de 51	
Del Este	5	21	17	6	10	59
Femenino		8	12	3	3	26
Masculino	5	13	5	3	7	33
La Paz	3	42	15	9	9	78
Femenino	2	14	11	3	3	33
Masculino	1	28	4	6	6	45
La Sabana	6	154	114	44	36	354
Femenino	2	39	45	18	12	116
Masculino	4	115	69	26	24	238
Total general	14	217	146	59	55	491

V. RESULTADOS Y SU DISCUSIÓN

A. Accesibilidad de los parques

La accesibilidad de los parques ha sido identificada como uno de los más importantes factores de uso [10], [11]. Sin embargo, este acceso va más allá de la distancia física, hay otros elementos intangibles, como se indicó, que conforman una accesibilidad percibida [10]. La Fig 1 muestra las frecuencias de visita a cada parque y la Fig 2 presenta las horas de visita.

Los resultados evidencian que prácticamente 60% de las personas los visita al menos una vez al mes. El menor valor fue para La Paz, donde un porcentaje importante habían ido solo esa vez. En contraposición se observa, en el caso de la Sabana y de la Paz, aproximadamente 20% de las personas encuestadas los visitan dos o más veces por semana. Este valor fue mucho menor en el caso del Este (menos de 4%), lo que puede estar relacionado con que el acceso no es gratuito. En ese sentido, es claro que los tres parques representan un espacio de visita frecuente. Según se observa en la Fig 2, más del 75% de los visitantes acuden en horas de la mañana. Se ha podido determinar

cómo los horarios de visitación están relacionados con la sensación de seguridad, con variación del comportamiento entre hombres y mujeres. Se evidenció además que el grueso de los visitantes los usan de manera regular y para actividades cotidianas.



Fig 1. Frecuencia de visita a los parques

Fig 2. Horas de visita a los parques

B. Evaluación de servicios e infraestructura de los parques

Para que un parque regional sea un adecuado espacio público y dote de vitalidad a la ciudad requiere contar con servicios e infraestructura variada, de calidad y en buenas condiciones. Por ello se evaluaron estos aspectos desde el punto de vista de las personas usuarias (Fig. 3).

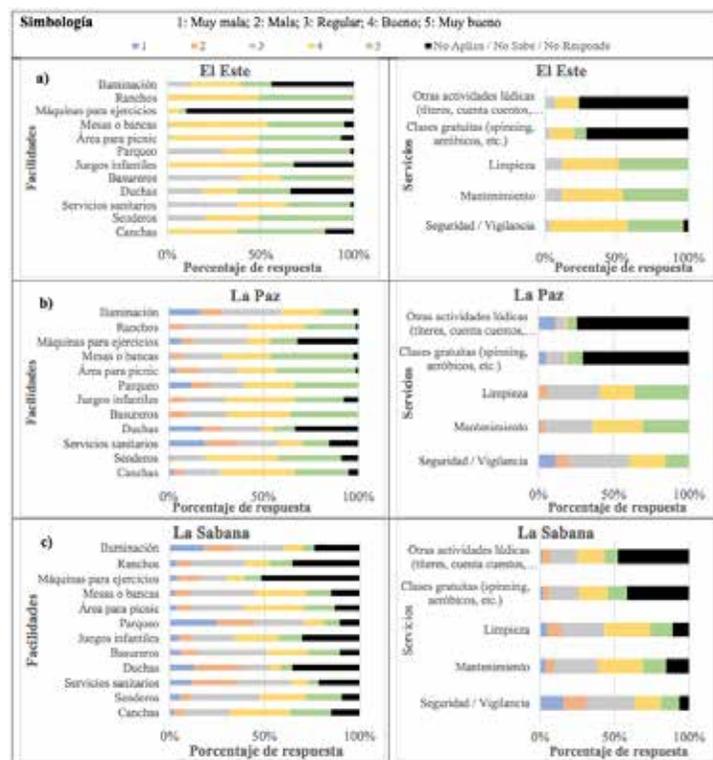


Fig 3. Evaluación de las facilidades y servicios según personas encuestadas: a) El Este; b) La Paz; c) La Sabana.

Los resultados evidencian como El Este recibe mejores calificaciones que los otros, lo que puede deberse a que su sistema de administración y acceso pagado facilita el cuidado y mantenimiento, lo cual fue corroborado con su administrador. Debates internacionales han señalado que delegar en organizaciones (públicas o privadas) la administración de espacios recreativos del Estado no necesariamente afecta su carácter público, por el contrario, permite la inclusión de más actores locales en el mantenimiento. Sin embargo, es necesario tener cautela con el control que estas organizaciones pueden ejercer sobre el acceso [16]. También se evidenció que servicios complementarios como lo son actividades lúdicas organizadas o clases, son recursos poco utilizados.

Finalmente, al consultar sobre las razones por las que visita cada parque (Fig. 4) se evidencia que la variable de infraestructura disponible es una de las más relevantes, junto con la gratuidad y la cercanía. Esto llama la atención en la necesidad de trabajar desde la planificación urbana para contar con parques con infraestructura acorde a todas las necesidades.

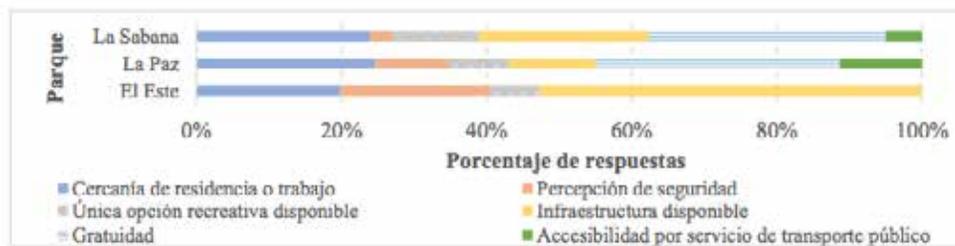


Fig 4. Razones para visitar el parque, según personas encuestadas.

C. Movilidad desde y hacia los parques

Wang, Brown y Liu [10] identificaron que una caminata placentera hacia el parque era uno de los factores más importantes de accesibilidad (máximo de 800 metros). Por ello, uno de los puntos de estudio definió justamente el medio de transporte utilizado y el tiempo de viaje, los resultados están en las Fig 5 y 6.

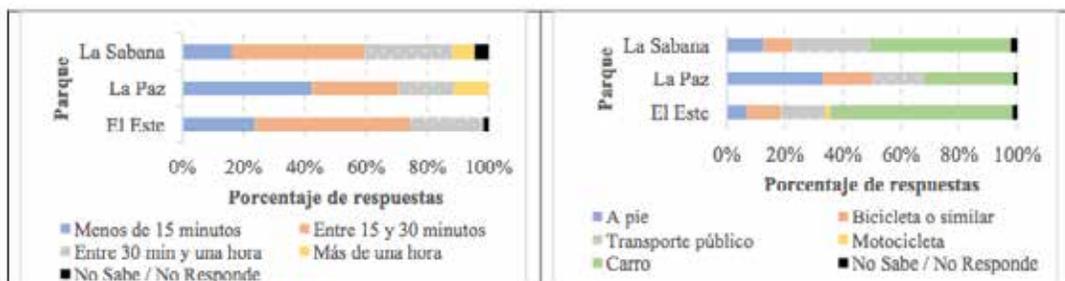


Fig. 5. Tiempo estimado requerido para llegar al parque, según las personas encuestadas
 Fig 6. Medio de transporte utilizado para llegar al parque, según personas encuestadas.

Los resultados muestran como existe una dependencia, al 95% de confianza, entre el parque estudiado y el tiempo de llegada de las personas; al igual que se evidenció dependencia también entre el parque y el medio de transporte utilizado. Los resultados reflejan que la mayor cantidad de usuarios llega en vehículo propio, y viajan entre 15 y 30 minutos. Siempre en el análisis de la movilidad, también se analizó la distancia recorrida (Fig 7), dando como resultado una dependencia entre las variables, donde se evidencia que la mayoría de los usuarios vienen de lejos. Al contrastar la distancia recorrida con el medio de transporte (Fig 8) parece que no hay dependencia entre las variables ($p\text{-value} = 1.0$, al 95% de confiabilidad), pues los resultados evidencian que muchos vecinos cercanos acuden al parque en carro y otros que vienen de más de 2 km llegan a pie. Siempre se evidenció que la población que llega en transporte público es baja, lo que se puede deber a las dificultades del servicio o la falta de conectividad de las rutas.

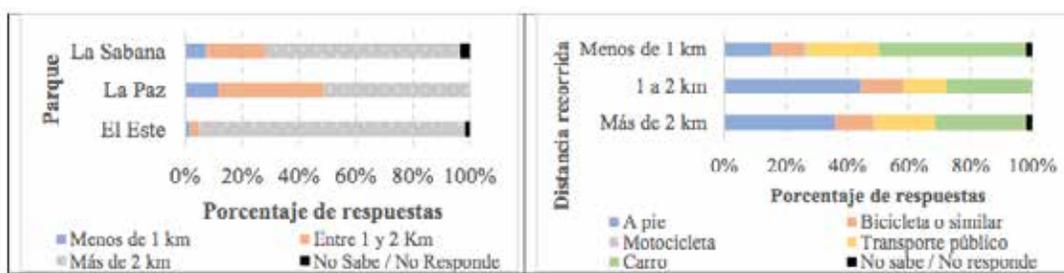


Fig 7. Distancia en disposición de recorrer para llegar, según personas encuestadas.
 Fig 8. Medio de transporte utilizado y distancia recorrida, según personas encuestadas

VI. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la ingeniería, se requiere aportar en la planificación y la accesibilidad de espacios públicos para las ciudades. Se evidenció la importancia para la GAM de los parques regionales, las necesidades que cubren, y las carencias que se tienen en infraestructura recreativa y medios de transporte articulados para su uso. Esto llama a la reflexión sobre la necesidad de diseños urbanos más integrales, que contemplen ingeniería, planificación y arquitectura urbana.

Las personas usuarias visitan los parques principalmente en busca de opciones de recreación diversas y con infraestructura disponible, pese a la distancia. El recorrido promedio para las personas que van a pie supera 1 km, valor que está por encima de lo recomendado. La mayoría de las personas encuestadas tarda 30 minutos en llegar, tiempo que se considera elevado, más si considerando que el transporte más utilizado es el automóvil, con un bajo uso del transporte público, lo que sugiere una desigualdad de acceso y problemas con la disponibilidad para moverse hacia o desde el parque. En este sentido parte de los grandes retos de planificación urbana es la articulación del sistema transporte público con los parques regionales, donde las rutas deliberadamente permitan a las poblaciones cercanas acceder más fácilmente a estos espacios. Por otra parte, es notable como en El Este la calidad de la infraestructura y seguridad son los factores más importantes de uso y que coinciden además con el nivel de satisfacción del mantenimiento, en contraste con los otros dos

parques de acceso gratuito. En este sentido sería importante explorar mecanismos de administración que permitan un mantenimiento adecuado sin que esto implique costos adicionales para la población. Quedan aún retos importantes que explorar, en especial vinculados a la seguridad, real y percibida, en estos espacios y su relación con los patrones de uso de estos parques urbanos.

VII. REFERENCIAS

- [1] PEN, “Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible,” San José, 2015.
- [2] CNPU, “Política Nacional de Desarrollo Urbano Plan de Acción 2018–2022,” San José, 2018.
- [3] P. González, “Derecho humano al tiempo libre y la recreación y su incidencia en la productividad de los trabajadores,” *Ánfora*, vol. 25, pp. 69–90, 2018, doi: 10.30854/anf.v25.n44.2018.392.
- [4] J. Cloutier, *Petit traité de communication*. Québec: Telemédiateur Inc, 2001.
- [5] J. Bolívar, “Calidad de vida a través de actividades físicas y recreativas en el centro de adultos mayores Changaimina, cantón Gonzanamá, provincia de Loja,” Universidad Nacional de Loja, 2016.
- [6] J. Borja and Z. Muxi, *El espacio público : ciudad y ciudadanía*. Barcelona: Diputació de Barcelona y Electa, 2001.
- [7] A. Chiesa, “The role of urban parks for the sustainable city,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 68, no. 1, pp. 129–138, May 2004, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2003.08.003.
- [8] C. Ambrey and C. Fleming, “Public Greenspace and Life Satisfaction in Urban Australia,” *Urban Stud.*, vol. 51, no. 6, pp. 1290–1321, 2014, doi: 10.1177/0042098013494417.
- [9] E. K. Nisbet, J. M. Zelenski, and S. A. Murphy, “Happiness is in our Nature: Exploring Nature Relatedness as a Contributor to Subjective Well-Being,” *J. Happiness Stud.*, vol. 12, no. 2, pp. 303–322, 2011, doi: 10.1007/s10902-010-9197-7.
- [10] D. Wang, G. Brown, and Y. Liu, “The physical and non-physical factors that influence perceived access to urban parks,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 133, pp. 53–66, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.LANDURBPLAN.2014.09.007.
- [11] I. Dwiputra, A. Tampubolon, and H. E. Kusuma, “The influence of user activity and environmental characteristics dimensions on sense of place in city parks,” *J. Archit. Built Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 165–172, Jan. 2019, doi: 10.9744/dimensi.45.2.165-172.
- [12] A. Vargas and P. Roldán, “Ni muy cerca ni muy lejos: parques urbanos y bienestar subjetivo en la ciudad de Barranquilla, Colombia,” *Lect. Econ.*, vol. 88, pp. 183–205, Jun. 2018, doi: 10.17533/udea.le.n88a06.
- [13] C. De Magalhães and M. Carmona, “Dimensions and models of contemporary public space management in England,” *J. Environ. Plan. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 111–129, Jan. 2009, doi: 10.1080/09640560802504704.
- [14] R. Pujol and K. Barrantes, “Áreas Recreativas en la GAM,” in *Activaciones Urbanas para la apropiación del Espacio Público*, ONU-Hábitat, Ed. San José, Costa Rica: Organización de las Naciones Unidas, 2013, pp. 40–45.
- [15] STATSOFT, “Statistica 10.0.” StatSoft Inc., 2011.
- [16] C. De Magalhães and S. Freire Trigo, “Contracting out publicness: The private management of the urban public realm and its implications,” *Prog. Plann.*, vol. 115, pp. 1–28, Jul. 2017, doi: 10.1016/J.PROGRESS.2016.01.001.

Modelo de secado tangencial circulante aplicado a la madera *Cupressus lusitánica* en una zona volcánica

Tangential Circulating Drying Model Applied to *Cupressus lusitánica* Wood in Volcanic Area

Viviana Paniagua Hernández
Escuela de Arquitectura, UCR.

correo electrónico: viviana.paniaguahernandez@ucr.ac.cr

Javier Corrales Vargas
Escuela de Ingeniería Química, UCR

Daniel Matamoros Arnáez
Escuela de Ingeniería Química

Cindy Torres Quirós
Escuela de Ingeniería Química, CICIMA, UCR

Palabras clave:

CINÉTICA de secado, contenido de humedad en equilibrio, *Cupressus lusitánica*, secado madera, transferencia de masa.

Keywords:

Drying KINETICS, equilibrium moisture content, *Cupressus lusitánica*, wood drying, mass transfer.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación propone un modelo tangencial circulante para el estudio del proceso de secado del *Cupressus lusitánica*. Se realizó un seguimiento experimental de la intemperie con datos del clima en el Volcán Poás durante seis meses para establecer las variables experimentales de velocidad de circulación de aire en el laboratorio, la cual fue en promedio 1,4 m/s. Bajo estas condiciones de velocidad de aire se determinaron las curvas y las cinéticas de secado de la especie conífera de interés. Se obtuvo los coeficientes de transferencia de masa del agua hacia la fase gaseosa (K_y) aire, a distintas temperaturas (26, 30, 34, 42) °C. Se estimó el contenido de humedad de equilibrio (CHE) por medio del contenido de humedad contra tiempo, el cual fue de (0,12±0,02) kg humedad/ kg masa seca, observando un incremento en los gradientes de velocidad de secado al incrementar la temperatura. A bajas temperaturas los valores de K_y son del orden de $2,3 \times 10^{-03}$ kg m⁻² s⁻¹ tendiendo a la estabilidad cercano a ese valor. La información generada proporciona conocimiento clave sobre

los procesos de difusión que inciden en el material a escala macroscópica asociada a la capilaridad de los lúmenes para el transporte de agua no ligada para potenciales aplicaciones.

El cambio climático ha interpuesto retos importantes para modificar las conductas y actividades humanas. El sector construcción y el diseño arquitectónico requieren ideas, investigación y recursos para incluir estrategias que favorezcan el desarrollo sostenible de infraestructura y componentes de espacio público y mobiliario urbano. Los materiales utilizados para la creación de dichas obras deben resistir las condiciones atmosféricas. El efecto de la intemperie en los materiales, y dentro de ellos la madera, provoca el fenómeno conocido como “corrosión químico-atmosférica”, en la cual el grado de degradación por productos químicos depende de la humedad; ya que las sales solubles en agua se difunden más profundamente en la madera húmeda [1], [2]. Así mismo, los procesos de adsorción y desorción de humedad modifican sus propiedades mecánicas [3], [4]. La madera se conforma principalmente por biopolímeros cuya naturaleza le atribuye una condición higroscópica, específicamente por la interacción de los grupos $-OH$ con las moléculas de agua adsorbidas [5]. En ese sentido hay un momento en el que la presión del vapor de agua es importante, ya que, durante el proceso de transferencia de masa, el agua no ligada se elimina primero de la matriz sólida por mecanismos de capilaridad hasta llegar al PSF (punto de saturación de fibras), el cual se reporta en la literatura en aproximadamente 28-30%, del contenido de humedad $0.28 \approx 0.30$ kg de agua/kg de sólido seco para coníferas. El *Cupressus lusitánica* es una conífera de importancia comercial en Costa Rica [6].

El transporte de humedad en los materiales capilaro-porosos como la madera es un fenómeno difícil de modelar, pues además de la difusión molecular, el transporte de agua puede ser debido también a la difusión de vapor, difusión superficial, difusión knudsen, flujo capilar, flujo hidrodinámico, entre otros mecanismos [5]. Este proceso ocurre por la difusión de moléculas de agua dentro de la madera por el equilibrio psicométrico con el ambiente variante conforme pasan las horas del día; y por la difusión de moléculas de agua. Engelund et al., (2021), [7], [8], han desarrollado modelos de difusión para comprender el transporte interno en el material, mientras que Agoua y Perré (2010) [9] [17]., desarrollaron propuestas para el estudio del secado de madera con énfasis en el análisis del proceso productivo. Los modelos de dosis-respuesta propuestos por Isaksson et al., (2013) y por otros autores [10], [11], se enfocan en una cuantificación del efecto de la intemperie en la madera más que el estudio de la interacción de la atmósfera circulante con la transferencia de la humedad. En cuanto a la transferencia de calor al interior de una pieza de madera (durante el secado), esta se da por conducción, por lo cual esta se debe tener en cuenta como parámetro motor al gradiente de temperatura que se desarrolla a lo largo del espesor de la pieza [12]. Con respecto a los modelos matemáticos aplicados al secado de materiales estos tienen varias clasificaciones dependiendo de las simplificaciones de un proceso, volumen de control o abordaje de resolución[5]. Esta investigación propone el modelo de secado tangencial como simplificación del sistema para la comprensión del proceso de transporte de agua no ligada hacia el aire de la intemperie que interactúa con la madera, según condiciones psicométricas de una zona volcánica en Costa Rica.

II. MÉTODOS

El registro de los datos en campo el sitio de estudio el Volcán Poás y en el Braulio Carrillo (sitio que sirvió como control), ambos con altitud y condiciones climáticas muy similares, el monitoreo se realizó con estaciones meteorológicas (Davis instruments, modelo wireless-vantage-pro2, sensores Vaisala y registradores Campbell Scientific). Las variables de interés medidas fueron temperatura ($^{\circ}\text{C}$), velocidad del viento (km/h) y su dirección cardinal, las cuales se midieron durante los meses de noviembre de 2020 a abril de 2021. Para la fase experimental de secado se utilizaron muestras de madera de la especie *Cupressus lusitánica* con las siguientes características: 40 años de edad, dimensiones en promedio 300 mm de largo, 100 mm de ancho con un espesor de 2 mm. Para conservar la humedad de estas, se colocaron en bolsas especiales Grainpro™. El contenido de humedad inicial se midió siguiendo la norma ASTM D4442 [13]. El secado se realizó en un túnel de secado tipo CE 130 Gunt Hamburg, con un flujo tangencial utilizando un diseño unifactorial con la temperatura como factor de estudio y cuatro niveles (26, 30, 34, 42) $^{\circ}\text{C}$. La velocidad del aire fue de 1,4 m/s como variable fija. La temperatura superficial del sólido se midió con termopares tipo J, conectados simultáneamente y eléctricamente aislados para reducir el error del sistema. Se utilizó un sistema de adquisición de datos marca National Instruments y un software LabVIEW para el registro de las variables. El tiempo de secado fue de 24 horas, con muestreo de masa cada 60 segundos. Con respecto al tratamiento de los datos, se eliminaron los datos atípicos haciendo uso de la prueba de Rosner y posteriormente se realizó un suavizado aplicando un filtro Savitzky-Golay. Ambas pruebas se realizaron en el software de MATLAB. Los k_y obtenidos a diferentes temperaturas fueron ajustados a un modelo exponencial por medio de una regresión no lineal haciendo uso del ToolBox de estadística y machine learning de MATLAB.

III. RESULTADOS

Determinación de las condiciones a simular en la cámara de secado

La intemperie es un sistema multivariable y la predicción de fenómenos de transporte entre la madera y el ambiente es compleja. En ese sentido, para la simplificación del análisis se caracterizaron diferentes elementos climáticos de una zona volcánica, así como de una zona de control, durante varios meses. Los resultados del comportamiento en el período de estudio se muestran en las Fig. 1. y Fig. 2.

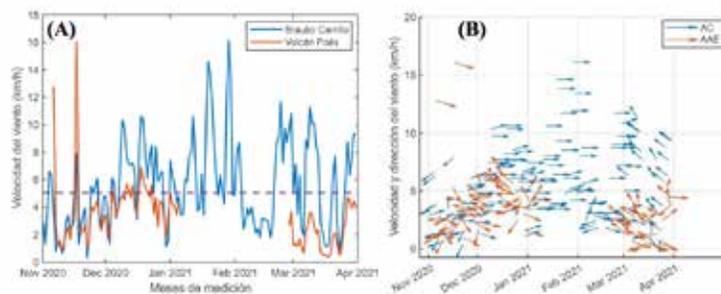


Fig. 1. Caracterización del perfil de viento durante el periodo de estudio (noviembre 2020-Abril 2021). (A) Velocidad, (B) Dirección.

Durante el período de estudio el valor promedio de la velocidad de viento fue 5,04 km/h, es decir 1,40 m/s. La dirección del viento es variable en ambas locaciones por lo que para el análisis fue necesaria la simplificación, considerando el aporte unidireccional a la transferencia a la fase gaseosa como un supuesto del modelo a aplicar. Ambos sitios, Volcán Poás y Braulio Carrillo, mostraron patrones de comportamiento similares de velocidad. Ahora bien, en el caso de la temperatura, se puede observar el perfil en la Fig. 2 (A), la importante variación durante las horas. La Fig. 2 (B) muestra la cuantificación de la variación entre las horas del día y la noche, lo que provoca condiciones psicrométricas sustancialmente diferentes e impactos en los patrones de difusión. Estos resultados de campo evidencian la necesidad de establecer para la experimentación en ambiente controlado una tendencia del coeficiente de transferencia de masa, de tal manera que permita estimar razonablemente la transferencia a temperaturas registradas en campo, es decir, menores a la temperatura ambiente.

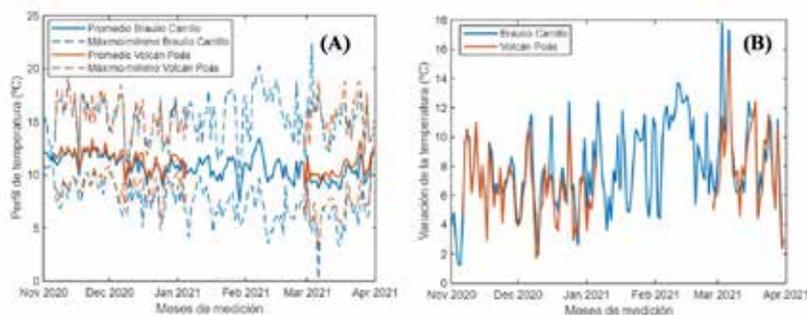


Fig. 2. Caracterización de temperatura de noviembre 2020 a abril 2021 de las zonas de estudio (A) Perfil promedio y máximos y mínimos (B) Cambios entre día y noche.

Análisis del proceso de secado en condiciones controladas

Las curvas de secado obtenidas experimentalmente para el *Cupressus lusitánica* mostraron un comportamiento parabólico como se muestra en la Fig. 3 (A), con una humedad en el equilibrio similar (0.12 ± 0.02) kg humedad/kg masa seca para las diferentes temperaturas estudiadas. Es importante mencionar que se seleccionó un ámbito de temperaturas levemente mayor para el estudio para analizar las tendencias presentadas en el coeficiente de transferencia de masa para esta especie. Por otra parte, las curvas de rapidez de secado se muestran en la Fig. 3 (B). Estas varían según la temperatura de operación, con pendientes similares para las tres temperaturas menores en la primera etapa del secado, la cual se encuentra desde la humedad inicial hasta aproximadamente 0,4 kg humedad/kg masa seca.

El material capilo-poroso *Cupressus lusitánica*, cuenta con poros sustancialmente grandes de alrededor de $30 \mu\text{m}$, lo que facilita que los capilares e intersticios del sólido, llenos de líquido, favorezcan el proceso de difusión del agua hacia la superficie, cuyas dimensiones se pueden observar en la Fig. 4. para esta especie.

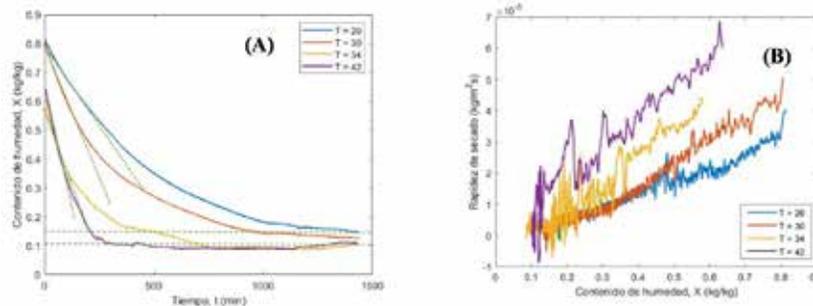


Fig. 3. (A) Curvas de contenido de humedad contra tiempo y (B) Rapidez de secado para las temperaturas estudiadas (26, 30, 34, 42) °C

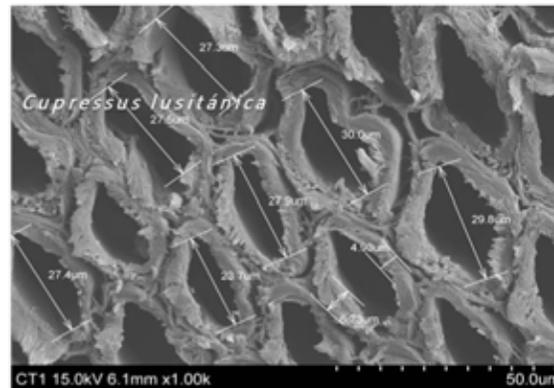


Fig. 4. Corte microscópico transversal de la superficie expuesta al secado de una muestra de *Cupressus lusitánica*, obtenido por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB).

El valor crítico de humedad obtenido para cada temperatura (26, 30, 34, 42) °C fue de (0.49, 0.47, 0.36 0.436) % m/m, lo que evidencia un comportamiento esperado por darse un secado en el material capilo- poroso. Es importante destacar que los procesos de difusión siguen un comportamiento según la ley de Fick y no se observa de forma evidente la zona de rapidez constae, ya que la rapidez de secado en la superficie saturada y no saturada ocurren por mecanismos similares y provoca un efecto de capilaridad durante la evaporación instantánea del agua en la superficie del poro [14]. En virtud de estos resultados, se puede realizar el análisis de la transferencia de agua de la superficie líquida a la fase gaseosa por medio de un modelo de secado de circulación tangencial. Si bien algunos autores han aplicado el supuesto de temperatura constante de la superficie durante el secado [15], en el presente trabajo se dio seguimiento experimental para el control del valor, el cual se cumple en el ámbito de rapidez para cada una de las temperaturas del diseño experimental. Así mismo, se determinó el coeficiente de transferencia de masa del aire, k_y , antes de que se dé la reducción de la velocidad en el punto crítico para cada temperatura, mediante el modelo de secado tangencial que se muestra en la Ec.1.

$$N = k_y(Y_s - Y) \tag{1}$$

Donde N es la rapidez de secado en $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, k_y es el coeficiente de transferencia de masa del aire $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, $(Y_s - Y)$ corresponde a la fuerza motriz en unidades de humedad absoluta entre la superficie de la madera (a la temperatura del líquido) y la corriente de aire respectivamente en kg humedad/ kg aire seco. La estimación de los coeficientes de transferencia de masa para la especie de madera en estudio a las distintas temperaturas de interés se muestra en la Tabla 1.

La tendencia del coeficiente muestra un crecimiento exponencial en relación con la temperatura, lo propone reducciones menores a temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, o gradientes menores en el coeficiente temperaturas análogas a los sitios de estudio en el Volcán Poás y en el Braulio Carrillo. Dicha tendencia se observa en la Fig. 5.

TABLA I.
COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA A LAS
TEMPERATURAS DE ESTUDIO PARA EL *CUPRESSUS LUSITÁNICA*

Temperatura (°C)	k_y	Unidad
26	2.39×10^{-03}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
30	2.76×10^{-03}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
34	4.52×10^{-03}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$
42	2.10×10^{-02}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$

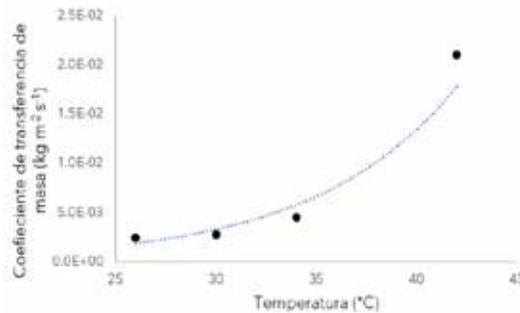


Fig. 5. Coeficiente de transferencia de masa k_y a las temperaturas de (26, 30, 34, 42) °C.

El modelo empírico para el para el coeficiente de transferencia de masa ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$) Cupressus lusitánica en función de la temperatura (°C) obtenido se muestra en la ecuación Ec.2.

$$k_y = 5.00 \times 10^{-5} e^{(0.141 T)} \tag{2}$$

Este modelo se ajusta con un coeficiente de determinación (R^2) del 98.5 % y un error cuadrático medio de 2.87×10^{-6} . Si se analizan las temperaturas entre (13-18) °C como aproximación al

comportamiento de los sitios en estudio mostrado en la Fig. 2 (A), se podría predecir que el k_y ronda valores entre $(3.14 \times 10^{-04} - 6.36 \times 10^{-04})$ kg/m²s, los cuales se encuentran en un orden de magnitud menor a temperaturas de secado en ambiente controlado, y dan una noción del proceso de difusión que puede ocurrir en la especie de madera en estudio a la intemperie. Dichos resultados son consistentes con lo reportado en cámaras controladas por Chrusciel et al. (1999) para el *Picea abies Kasrst*, enfatizando la importancia del grosor para el impacto en el proceso de transporte de la humedad hacia la fase gaseosa [16].

IV. CONCLUSIONES

- Se determinó un modelo de secado tangencial circulante empírico para determinar el coeficiente de transferencia de masa del aire (fase gaseosa) para *Cupressus lusitánica* a una velocidad del aire análoga a las condiciones de la zona volcánica del Volcán Poás.
- Se caracterizó la intemperie de la zona volcánica por medio de los perfiles de velocidad y dirección del viento, así como los perfiles de temperatura para simular el secado y la estimación de la transferencia de humedad a la fase gaseosa o masa de aire a la intemperie.
- A bajas temperaturas los valores de transferencia son del orden de $2.3 \times 10^{-03} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. A su vez, éste incrementa sustancialmente con el aumento de temperatura. Para temperaturas (13-18) °C se aproximan transferencias del orden de $(3.14 \times 10^{-04} - 6.36 \times 10^{-04})$ kg/m²s.
- La información generada proporciona conocimiento clave sobre los procesos de difusión que inciden en el material asociados a la capilaridad de los lúmenes para el transporte de agua no ligada para potenciales aplicaciones del uso de la madera en esta zona volcánica.

V. REFERENCIAS

- [1] I. Reinprecht, L., & Makovíny, "Diffusion of inorganic salt-CuSO₄ in the wood structure," *Latest Achiev. Res. Wood Struct.*, 1990.
- [2] K. Erler, "Korrosion und Anpassungsfaktoren for chemisch-aggressive Medien bei Holzkonstruktionen," *Holztechnologie*, 1990.
- [3] M. Simo-Tagne, L. Bennamoun, A. Léonard, and Y. Rogaume, "Determination and modeling of the isotherms of adsorption/desorption and thermodynamic properties of obeche and lotofa using nelson's sorption model," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 55, no. 8, pp. 2185–2197, Aug. 2019, doi: 10.1007/S00231-019-02577-2/FIGURES/13.
- [4] I. D. Cave, "Modelling moisture-related mechanical properties of wood Part I: Properties of the wood constituents.," *Wood Sci. Technol.*, vol. 12(1), pp. 75-86., 1978.
- [5] S. Sandoval-Torres, "Modelación matemática del secado convencional de madera," *Madera y bosques*, vol. 15(1), pp. 75-89., 2009.
- [6] S. Barrantes, A. Ugalde, "Usos y aportes de la madera en Costa Rica estadísticas 2019 precios 2020," *Oficina Nacional Forestal ONF*, San José CR, Aug-2019.
- [7] M. Fredriksson and E. E. Thybring, "Scanning or desorption isotherms? Characterising sorption hysteresis of wood," *Cellulose*, vol. 25, no. 8, pp. 4477–4485, Aug. 2018, doi: 10.1007/S10570-018-1898-9.

- [8] L. G. Thygesen, E. Tang Engelund, and P. Hoffmeyer, "Water sorption in wood and modified wood at high values of relative humidity. Part I: Results for untreated, acetylated, and furfurylated Norway spruce," *Holzforschung*, vol. 64, no. 3, pp. 315–323, Apr. 2010, doi: 10.1515/HF.2010.044/HTML.
- [9] E. Agoua and P. Perré, "Mass transfer in wood: identification of structural parameteres, difusivity and permeability measurements," *J. Porous Media*, vol. 13, no. 11, pp. 1017–1024, 2010, doi: 10.1615/JPORMEDIA.V13.I11.80.
- [10] T. Isaksson, C. Brischke, and S. Thelandersson, "Development of decay performance models for outdoor timber structures," *Mater. Struct. Constr.*, 2013, doi: 10.1617/s11527-012-9965-4.
- [11] C. R. Brischke, C., Rapp, A. O., Bayerbach, R., Morsing, N., Fynholm, P., & Welzbacher, "Monitoring the 'material climate' of wood to predict the potential for decay: Results from in situ measurements on buildings," *Build. Environ.*, vol. 43(10), pp. 1575–1582, 2008.
- [12] P. Xu, A. Sasmito, and A. Mujumdar, "Heat and Mass Transfer in Drying of Porous Media," in *Heat and Mass Transfer in Drying of Porous Media*, Taylor and., CRC Press, Boca Raton NY, 2019, pp. 15–72.
- [13] ASTM-D4442-16, "Standard Test Methods For Direct Moisture Content Measurement Of Wood And Wood-Based Materials." ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- [14] R. Treybal and A. G. Rodríguez, *Operaciones de transferencia de masa*, 2nd editio. Madrid, España, 1988.
- [15] J. Eriksson, J., Johansson, H., & Danvind, "A mass transport model for drying wood under isothermal conditions.," *Dry. Technol.*, vol. 25(3), pp. 433-439., 2007.
- [16] T. Chrusciel, L., Mougél, E., Zoulalian, A., & Meunier, "Characterisation of water transfer in a low temperature convective wood drier: influence of the operating parameters on the mass transfer coefficient.," *Holz als Roh-und Werkstoff.*, 1999.
- [17] R. B. Ananias, R. A., Broche, W., Alvear, M., Salinas, C., & Keey, "Using an overall mass-transfer coefficient for prediction of drying of Chilean coigüe.," *Wood fiber Sci.*, pp. 426-432., 2009.

Modelo de un vehículo de péndulo invertido de dos ruedas con tracción dinámica

Modeling of a two-wheeled inverted-pendulum transporter with dynamic traction forces

Arnoldo Castro Castro

*Profesor, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR
correo electrónico: arnoldo.castrocastro@ucr.ac.cr*

Fabián Barrantes Ramírez

*Estudiante, Escuela de Ingeniería Mecánica, UCR
correo electrónico: fabian.barrantesramirez@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Autobalanceable, dinámica, simulación, tracción, vehículo.

Keywords:

Self-balancing, dynamics, simulation, traction, vehicle.

I. RESUMEN

Los vehículos de péndulo invertido de dos ruedas requieren de suficiente tracción entre sus ruedas y la superficie de ruedo para poder estabilizarse por medio de los torques aplicados por los motores a sus ruedas. Cuando la tracción no es suficiente, la estabilidad se pierde y el vehículo se puede comportar de manera impredecible e inestable. El modelo de tracción que se utiliza para simular las condiciones de baja fricción puede influir en las predicciones de estabilidad del vehículo. En este trabajo se compara la respuesta del vehículo al modelarse por medio de dos modelos de tracción diferentes. Se utiliza el modelo de tracción LuGre y se compara con resultados previos obtenidos utilizando un modelo estacionario de Pacejka.

II. INTRODUCCIÓN

Los vehículos de péndulo invertido de dos ruedas requieren de suficiente tracción en ambas ruedas para poder estabilizarse. Si una de sus ruedas pierde tracción y empieza a deslizar, tanto el vehículo como su ocupante pueden caer de manera abrupta, tal y como se identifica en [1].

La mayoría de la investigación en este tipo de vehículos se ha enfocado en el desarrollo de modelos dinámicos [2], controladores [3]-[6], en el estudio de los retos asociados a la variabilidad

de pesos y estaturas del ocupante [7], y en los riesgos de naturaleza dinámica presentes durante su uso [1].

La mayoría de la literatura que analiza el problema de deslizamiento entre las ruedas y la superficie de ruedo han utilizado mapas estacionarios de la fuerza longitudinal como una función de la razón de deslizamiento. Sorensen y Singhose utilizaron un modelo de fricción de Coulomb para estudiar el comportamiento del sistema durante el deslizamiento de las ruedas [8]. Kim y Sorensen, por su parte, compararon la efectividad de los modelos de fricción de Coulomb y el modelo de cepillo (brush) [9] en simular el inicio del deslizamiento y la dinámica general del vehículo [10]. En [11] se utilizó el modelo de Pacejka [12] para estudiar los efectos del deslizamiento en la dinámica del vehículo.

En esta investigación se implementa el modelo LuGre[13] de tracción dinámica en la simulación de un vehículo de péndulo invertido de dos ruedas con parámetros ajustados a los de una Segway i2, mostrada en la Figura



Fig. 1. Segway i2 Personal Transporter.

En la Sección III se describe el modelo dinámico del vehículo, su sistema de tracción, y el modelo de la fuerza entre la llanta y la superficie. En la Sección IV se presenta el comportamiento dinámico del vehículo en condiciones de baja tracción. Finalmente, en la Sección V se resumen las conclusiones de este estudio.

II. METODOLOGÍA

Se hizo una revisión bibliográfica para seleccionar un modelo de tracción dinámica. Una vez seleccionado el modelo LuGre, se ajustaron sus parámetros para reproducir la condición estacionaria del modelo de Pacejka. Seguidamente, se incorporaron las ecuaciones de tracción a las ecuaciones de movimiento del vehículo. Finalmente, se simuló acciones de frenado. La inclinación del vehículo y la razón de deslizamiento se compararon con los resultados obtenidos mediante el modelo de Pacejka para evaluar la relevancia de incorporar efectos dinámicos en el modelo de tracción.

III. MODELO DINÁMICO

A. Modelo del vehículo

En la Figura 2 se muestra un diagrama de un vehículo tipo péndulo invertido de dos ruedas restringido a traslación sobre una superficie plana. El péndulo se compone de la combinación de la base, el manubrio y la persona. La persona se modela como un cuerpo rígido apoyado sobre la base sin movimiento relativo a ella ni al manubrio. Este modelo es una aproximación del comportamiento de un usuario ante un movimiento inesperado ante el cual no puede reaccionar suficientemente rápido.

La base del péndulo se encuentra acoplada a dos motores que impulsan las ruedas derecha e izquierda aplicando torques T_r y T_l , respectivamente. El radio de las ruedas es r y la distancia entre ellas es $2w$. El origen del sistema de coordenadas local se ubica en el punto medio entre las ruedas y el centro de masa del péndulo se encuentra en las coordenadas (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 . Se considera que las llantas ruedan con deslizamiento por lo que:

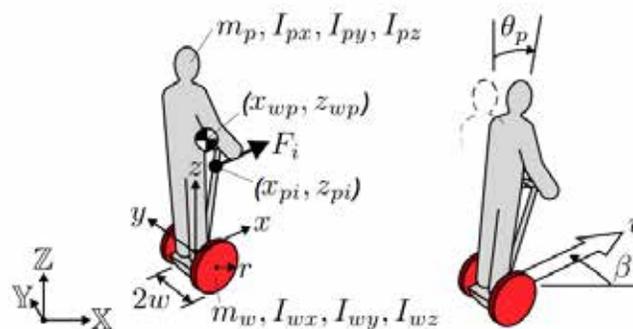


Fig. 2. Representación esquemática de un vehículo tipo péndulo invertido de dos ruedas.

$$\dot{\theta}_w r \neq v_w \quad (3)$$

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

La cinemática del vehículo con deslizamiento se describe en la Figura 3. El punto medio entre las llantas se traslada a una velocidad de v_x . Las ruedas giran a una velocidad $\dot{\theta}_w$. Las fuerzas de tracción/frenado en las llantas se denotan con la variable F_x .

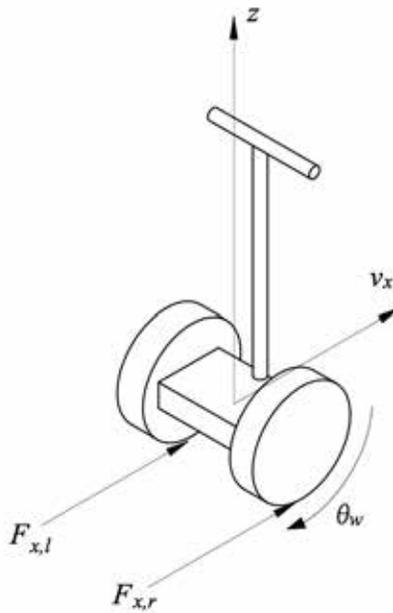


Fig. 3. Fuerzas de tracción.

B. Sistema de control

La estabilización del vehículo se efectúa por medio del método descrito en [6]. Dicho método se reduce a un controlador PD para el ángulo de inclinación del péndulo y un controlador PI con acción anticipativa para el giro alrededor del eje z comandado por el manubrio. Las ecuaciones que describen dichas leyes de control son:

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

$$\begin{aligned} T_r &= K_p (\theta_p - \theta_{des}) + K_d \dot{\theta}_p + T_\beta \\ T_\beta &= K_{ff} \dot{\beta}_{des} + K_{\beta p} (\dot{\beta} - \dot{\beta}_{des}) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_{\beta i} \int_0^t (\dot{\beta} - \dot{\beta}_{des}) dt \quad (4)$$

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 $T_i = T_r$ y todas las trayectorias simuladas son rectilíneas.

Las ganancias del controlador y los parámetros del vehículo fueron calibrados según el proceso descrito en [7] con el fin de emular la respuesta real de una Segway i2.

C. Modelo de tracción

En la literatura existen una gran cantidad de modelos para describir las fuerzas de tracción $F_{x,i}$ [3]. Uno de los más populares es el modelo de Pacejka [9], también conocido como Fórmula Mágica. Este se basa en un ajuste empírico de mediciones experimentales donde $F_{x,i}$ es directamente proporcional a la fuerza normal F_n entre la llanta y la superficie de rueda. La constante de proporcionalidad es $\mu(s)$, donde s es la razón de deslizamiento definida como:

$$s = \frac{\dot{\theta}_w r - v_w}{v_w} \quad (5)$$

Si bien el modelo de Pacejka describe con fidelidad el comportamiento de la fuerza de tracción en estado estacionario (a velocidad constante), no captura su comportamiento dinámico. Una descripción dinámica de las fuerzas de tracción por medio del modelo de fricción LuGre se describe en [14] y está dada por:

$$\dot{\bar{z}}(t) = v_r + \frac{\sigma_0 |v_r|}{g(v_r)} \bar{z}(t) - \frac{\kappa}{L} |\dot{\theta}_w r| \bar{z}(t) \quad (6)$$

$$F_x(t) = [\sigma_0 \bar{z}(t) + \sigma_1 \dot{\bar{z}}(t) + \sigma_2 v_r] F_n \quad (7)$$

donde σ_0 es la rigidez longitudinal, σ_1 es el amortiguamiento longitudinal, σ_2 el amortiguamiento viscoso relativo, μ_c el coeficiente de fricción de Coulomb, μ_s el coeficiente de fricción estático, v_s la velocidad relativa de Stribeck, $v_r = r_{\theta_w} - v_w$ la velocidad relativa, z un estado de

deformación interno, L la longitud del área de contacto entre la llanta y la superficie de ruedo. La función $g(v_r)$ captura la dinámica de Stribeck en la interfaz entre la llanta el suelo y está dada por:

$$g(v_r) = \mu_S + (\mu_S - \mu_C)e^{-|\frac{v_r}{v_S}|^\alpha} \tag{8}$$

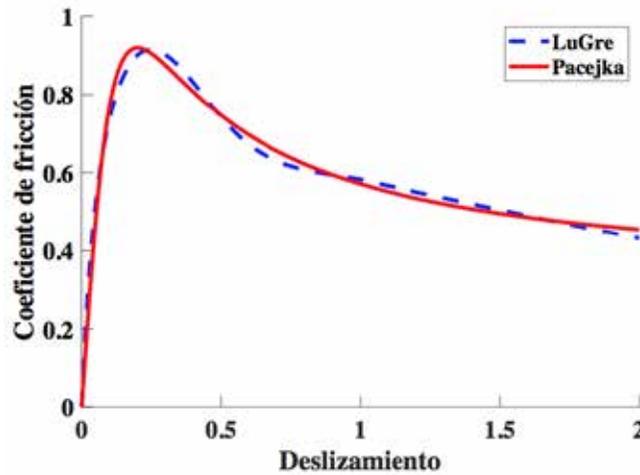


Fig. 4. Curvas estacionarias de Pacejka y LuGre.

donde el α es el parámetro de ajuste para la condición de fricción estacionaria.

La condición estacionaria del modelo de LuGre se puede obtener al igualar las derivadas a cero en las ecuaciones 6 y 7. La fuerza estacionaria, $F_{x,s}$, según LuGre es:

$$F_{x,s} = \left[\frac{\sigma_0 |v_r|}{\frac{\sigma_0 |v_r|}{g(v_r)} + \frac{\kappa}{L} |\omega r|} + \sigma_2 v_r \right] F_n \tag{9}$$

Con el fin de obtener una curva de tracción de referencia se aproximó la versión estacionaria del modelo de LuGre a la curva obtenida a partir del modelo de fricción de Pacejka en [11]. Lo anterior se llevó a cabo mediante una regresión no lineal utilizando Matlab. Para esto se ingresaron los pares ordenados de la curva de Pacejka para una superficie seca, las variables κ , v y L se definieron con valores constantes. Mediante el proceso iterativo del software se logró una buena aproximación y se obtuvieron los valores de μ_C , μ_S , σ_0 , σ_2 y v_S . Asimismo, se modificó el parámetro α del modelo de LuGre con el fin de obtener un mejor ajuste. Posteriormente, estos valores fueron utilizados para alimentar el modelo dinámico de LuGre. En la Figura 4 se muestran las curvas estacionarias de los modelos de Pacejka y LuGre.

El Cuadro 1 muestra los parámetros utilizados en las simulaciones.

V. RESULTADOS

Con el objetivo de estudiar el efecto del comportamiento dinámico de la fuerza de tracción en la respuesta dinámica del vehículo y en su capacidad para autobalancearse se simularon escenarios a un 20 % y 65 % de reducción en la tracción máxima disponible utilizando tanto las ecuaciones de Pacejka como el modelo de tracción de LuGre. En todas las simulaciones se estableció un ángulo de inclinación hacia atrás de 20° y una velocidad inicial de 5 m/s para emular una acción de frenado.

CUADRO I
Parámetros utilizados en las simulaciones del vehículo.

Parameter	Value	Parameter	Value
m_b	85 kg	m_p	37 kg
I_{bx}	12.56 kg·m ²	I_{px}	1.67 kg·m ²
I_{by}	16 kg·m ²	I_{py}	2.63 kg·m ²
I_{bz}	1.74 kg·m ²	I_{pz}	2.48 kg·m ²
m_w	4.5 kg	r	0.24 m
I_x, I_z	0.069 kg·m ²	I_y	0.068 kg·m ²
w	0.265 m	x_{wp}	-0.0182 m
z_{wp}	0.868 m	z_b	1.2 m
K_p	373.4	K_d	7.82
μ_s	1.2355	μ_c	0.7193
ν_s	0.3756	α	2.6
σ_0	424.78	σ_1	1
σ_2	0.1607	κ / L	24

La Figura 5 muestra el ángulo de inclinación θ_p y la razón de deslizamiento cuando el coeficiente de tracción máximo es de 0.736 (equivalente a una reducción del 20 % de la tracción máxima disponible). De la Figura 5a se observa que el modelo de tracción utilizado no tiene efecto alguno en la respuesta cuando la tracción entre el vehículo y la superficie es suficientemente alta de manera que el deslizamiento permanezca limitado. En 5b se observa que hay pequeñas diferencias en la razón de deslizamiento. El modelo LuGre permite un mayor deslizamiento pero aún así permite preservar la estabilidad del vehículo ya que este deslizamiento no aumenta desmedidamente.

En la Figura 6 se muestra la respuesta del vehículo para ambos modelos cuando la reducción en la tracción disponible es de 65 %. En este caso, el modelo de Pacejka muestra que el vehículo se vuelve inestable ya que el ángulo decrece hasta golpear el suelo a los -90°. Esto se explica por el aumento desmedido en la magnitud del deslizamiento mostrado en 6b. En este caso, aunque los motores del vehículo intentan acelerar la rueda, ésta aumenta su velocidad angular pero sin lograr impulsar el vehículo. La misma reducción de tracción no muestra inestabilidad en el caso cuando se utiliza el modelo de tracción LuGre. Esto es una clara indicación de que el modelo de tracción

utilizado en las simulaciones influye en la capacidad observada del vehículo para estabilizarse en condiciones de baja tracción.

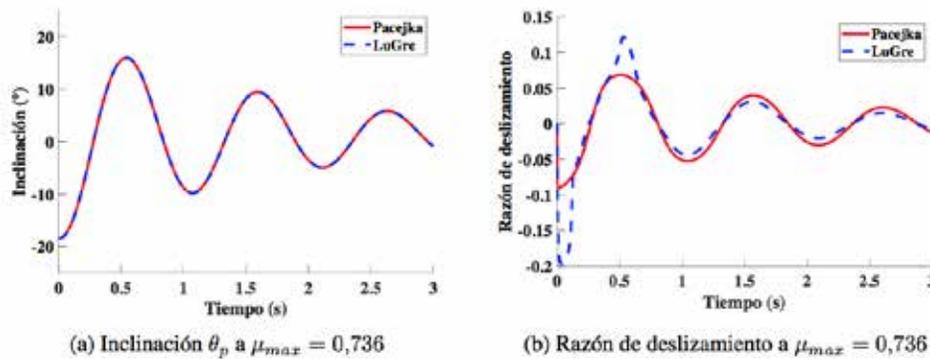


Fig. 5. Reducción de 20 % en la tracción máxima disponible.

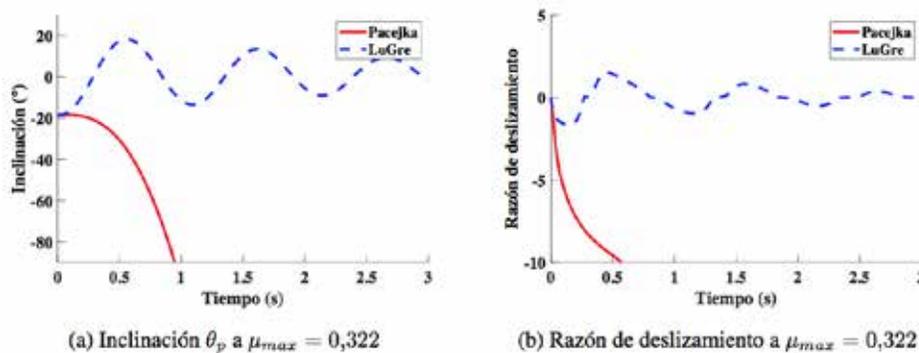


Fig. 6. Reducción de 65 % en la tracción máxima disponible.

VI. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas muestran que el vehículo pierde su capacidad para estabilizarse cuando la tracción de la superficie de rueda es reducida. Sin embargo, el modelo de tracción utilizado influye en los resultados observados. El modelo de Pacejka subestima la capacidad del vehículo para estabilizarse en comparación con el modelo LuGre.

VII. REFERENCIAS

- [1] W. Singhose, C. Adams y D. Kim, < A Dynamics-Based Hazard Analysis of Inverted-Pendulum Human Transporters Using Data-Mined Information, > *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, vol. 2, n.o 3, págs. 031007-031007-12, 2016. DOI: 10.1115/ 1.4032459.
- [2] A. Castro, W. Singhose, J. Potter y C. J. Adams, < Modeling and Experimental Testing of a Two-Wheeled

- Inverted-Pendulum Transporter,» en *ASME 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 11th Motion and Vibration Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Fort Lauderdale, FL, 2012, págs. 385-393.
- [3] Y. Ha y S. Yuta, « Trajectory tracking control for navigation of the inverse pendulum type self-contained mobile robot,» *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 17, n.o 1, págs. 65-80, 1996.
- [4] F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi y A. C. Rufer, « JOE: A Mobile, Inverted Pendulum,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, págs. 107-114, 2002.
- [5] K. Pathak y S. K. Agrawal, « Band-Limited Trajectory Planning and Tracking for Certain Dynamically Stabilized Mobile Systems,» *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 128, n.o 1, págs. 104-111, 2006.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] H. Pacejka, *Tire and vehicle dynamics*. Elsevier, 2005.
- [10] 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.
- [11] A. Castro, C. Adams y W. Singhose, « Effects of Surface Condition on Traction of Two-Wheeled Inverted- Pendulum Transporters,» en *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, vol. 59216, 2019, V003T01A040.
- [12] H. Pacejka, E. Bakker y L. Nyborg, « Tyre modelling for use in vehicle dynamics studies,» *SAE paper*, vol. 870421, 1987.
- [13] C. C. De Wit, H. Olsson, K. J. Astrom y P. Lischinsky, « A new model for control of systems with friction,» *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 40, n.o 3, págs. 419-425, 1995.
- [14] C. Canudas-de-Wit, P. Tsotras, E. Velenis, M. Basset y G. Gissinger, « Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction,» *Vehicle System Dynamics*, vol. 39, n.o 3, págs. 189-226, 2003.

La Impresión 3D con fines didácticos y de rescate histórico del Puente Ferroviario sobre el Río Grande

The 3D Printing Technology for didactic and historical preservation purposes of Railroad Bridge over the Río Grande

Gerardo Acuña Cook

Estudiante de Ingeniería Civil, UCR

correo electrónico: gerardo.acuna@ucr.ac.cr

Erick Mata Abdelnour

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, UCR

Palabras clave:

Puente ferroviario, Impresión 3d, FDM, Patrimonio histórico, Modelado 3d, Río Grande.

Keywords:

Railroad bridge, 3D Printing, FDM, Historical heritage, 3D Modeling, Rio Grande.

I. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX Costa Rica presentó un desarrollo vertiginoso gracias al aumento en las exportaciones de productos como el café y el banano, esto según Hall[1]. Lo que generó la necesidad de crear vías de comunicación modernas y eficientes que facilitarían la movilización de los productos. Este proceso de expansión en nuestros principales puntos de comercialización y desarrollo propició la construcción de obras de infraestructura de trascendencia como la carretera Interamericana, el Ferrocarril al Atlántico y el Ferrocarril al Pacífico. En la actualidad, de las obras que aún se conservan, algunas son consideradas Patrimonios Arquitectónicos por el Ministerio de Cultura y Juventud, entre ellos, destaca el Puente Ferroviario sobre el Río Grande de Atenas; el cual data del año 1901. Hoy en día este importante y majestuoso legado de Ingeniería es un sitio de interés turístico en la zona y no posee planes de rehabilitación o mantenimiento[2].

Con la necesidad de preservar la historia y los métodos ingenieriles de las obras patrimoniales se ha planteado la idea de utilizar tecnologías de vanguardia como modelos con escaneo tridimensional (3D) o réplicas de las obras a escala mediante la impresión 3D. Siendo la impresión 3D un campo que se ha abordado por profesionales en ingeniería y arquitectura, como la réplica realizada a partir de la impresión del puente de Da Vinci del MIT [3]

Por tanto, el trabajo tiene por objetivo el modelado e impresión 3D del puente Ferroviario del Grande de Atenas para concientizar sobre su valor patrimonial y documentar las capacidades

ingenieriles existentes en la época. Para ello, en el presente trabajo se utilizó la tecnología de impresión 3D para lograr materializar a escala 1:100 un modelo virtual de una obra declarada por el Gobierno de Costa Rica, Patrimonio Histórico- Arquitectónico y así recrear las características de la obra como fue concebido en el pasado, dando como resultado una réplica a escala de 2.09 m de largo y 13 cm de ancho máximo.

En el modelo impreso solo se contempló la llamada infraestructura de la vía férrea, es decir, únicamente la estructura de soporte para el puente. Se excluye de esto los durmientes, rieles, barandas, luces y demás superestructura. Además, no se contemplará en el modelo la topografía del terreno ni la del cañón. Las piezas modeladas tienen un nivel esquematizado con información tridimensional parametrizada que equivale a un 40 % de la información total, esto se traduce a un LOD 200 (por sus siglas en inglés, Nivel de desarrollo), acorde a los niveles descritos por el American Institute of Architects. [4]

II. METODOLOGÍA

El trabajo pretende dar como resultado final un modelo a escala 1:100 de 2.09 m de largo del puente sobre el Río Grande de Atenas mediante el uso de la tecnología de impresión 3D bajo la metodología FDM (por sus siglas en inglés, Deposición de Material Fundido).

2.1 Investigación histórica

La etapa inicial del proyecto se basó en la recopilación de información importante para el desarrollo del proyecto. Esto se realizó mediante la indagación en distintas fuentes de información de libros, páginas web especializadas y revistas, las cuales formularán el marco teórico. Además, se identificaron los distintos aspectos constructivos y estructurales porque son la base de la modelación. De igual manera, se recopiló información a partir de entrevistas a personas que han ejecutado estudios sobre el puente, a las personas de entidades públicas que conozcan de la obra y profesionales expertos en el tema de impresión 3D.

2.2 Modelación e impresión 3D

Se realizó un modelo tridimensional virtual del puente, el cual se materializó utilizando la impresión 3D. El trabajo de Solano [5], fue la base para iniciar el modelado. Puesto que aportó la información de campo y un modelo 2D detallado del puente sobre el cual se realizó el modelo 3D, debido a que no se contaban con planos de la estructura. A partir de esto se modeló el puente con la información recopilada utilizando el programa Inventor.

Se empleó la impresora 3D Creator 3 de Flashforge que utiliza la tecnología FDM, para efectuar la impresión del modelo a escala reducida del puente. Además, se empleó el termoplástico PLA (ácido poliláctico) que es a base de aceites de maíz, que presenta mayor facilidad de impresión y calidad. Por estos parámetros, se determinó que la escala idónea para representar el puente es 1:100, debido a que esta es la menor escala que permite imprimir la sección más pequeña.

El importante que el modelo 3D cumpla con el LOD 200, debido a que este define a calidad que presentará el modelo impreso, cuando se imprime a partir de un modelo de baja calidad el resultado de la impresión no es el indicado. Por lo que no se dio por finalizado el proceso de modelado hasta que no cumpliera con al menos un LOD 200.

Es importante destacar que el éxito de un modelo impreso, referente a las experiencias vividas por el autor, depende de la calidad del modelo 3D virtual y la correcta calibración de los parámetros del equipo y el material a utilizar. Luego de esto, solo se requiere un correcto proceso de laminado y verificar cada cierto tiempo la impresión para verificar que no hay fallos. Para obtener como resultado final una sección del puente como se muestra en la Figura 1.

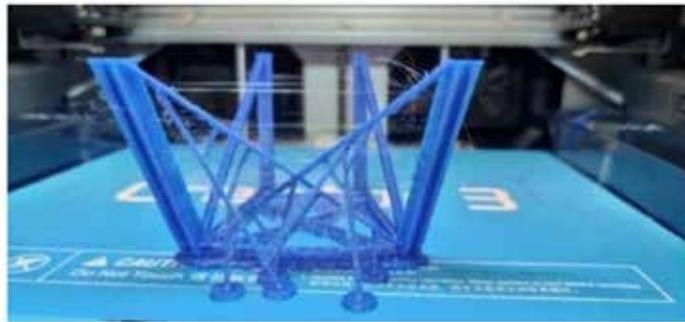


Fig. 1. Sección impresa del puente.

Una vez impreso el puente se debe de realizar el postprocesado de las piezas. Esto es para remover imperfecciones que se presenten en las piezas, para unir las y para darles acabado final con pintura.

2.3 Análisis de resultados

Finalmente, se analizó todo el proceso realizado en la etapa 2. Con esto se procedió a analizar la dificultad de la modelación tridimensional de la estructura del puente y, por otra parte, la dificultad que se tuvo en el proceso de impresión. Con esto se determinó la facilidad de replicación de este proceso en otras obras patrimoniales. De igual manera se recopiló a lo largo del proceso los costos a los que se incurren en la impresión del modelo, para entonces, determinar el costo unitario de la pieza creada.

III. RESULTADOS

Los resultados de la investigación se dan en 3 etapas, que fueron necesarias para lograr un modelo a escala reducida del Puente sobre el Río Grande de Atenas. En primera instancia se abarca la reseña histórica del Puente, luego el modelado y, por último, la materialización del modelo con la tecnología 3D.

3.1 Reseña histórica y retos de la ingeniería de la época.

La construcción del Ferrocarril al Pacífico, del que forma parte el puente ferroviario sobre el Río Grande, significó un enorme impulso al desarrollo de las zonas aledañas y las que se comunicaban con la Meseta Central a través de este, como la zona de Guanacaste. [6]

Además de su aporte socioeconómico, la construcción del puente, propicio que Costa Rica fuera reconocida internacionalmente en varios periódicos y publicaciones de ingeniería por ser un hito de la ingeniería de la época, esto por su diseño, longitud, dificultad de construcción y altura. El mismo fue diseñado por Theodore Cooper y la fábrica Milliken Brothers, consiste en un puente de arco de doble articulación de 209 m de largo y 103 m de alto[7]. Considerado el puente más alto de América en la fecha de su construcción. Se dice que al entregar la presidencia Rafael Iglesias en 1902, dijo que la obra era “la estructura más importante por sus condiciones y longitud”. Como se observa en la Figura 2.

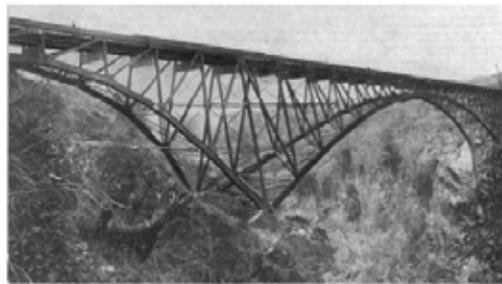


Fig. 2. Fotografía del puente al finalizar su construcción.[8]

La obra, además de sus características únicas, fue construida de manera exquisita, sin decesos humanos y con una exactitud milimétrica. La construcción inició ambos lados del cañón simultáneamente, para esto se envió el puente hasta puerto Limón en 3 cargamentos distintos. El puente salió de la fábrica pintado de dos colores, esto para diferenciar la sección del este de la del oeste, blanco y rojo respectivamente. Los materiales fueron transportados al sitio de la obra por ferrocarril, donde fueron descargados mediante una grúa de vapor a un patio de almacenamiento ubicado al lado este del cañón. Para el transporte de lado a lado del cañón se utilizó un teleférico.[7]

3.2 Modelado 3D y nivel de detalle alcanzado

Debido a la complejidad de realizar pruebas destructivas en elementos del puente por su carácter de patrimonio, los materiales y elementos que componen la estructura principal del puente (subestructura y superestructura) son descritos con base en visitas a campo y referencias bibliográficas[5].

El proceso de modelado incurre en una prueba y error para obtener un modelo que cumpla con un nivel de detalle LOD 200, mientras este cumple con las dimensiones mínimas que permitan ser impreso en 3D con las herramientas disponibles. En este nivel de detalle se omite el modelado de las placas y pernos de las uniones del puente.

La estructura principal tiene un peso de 932.5 toneladas[7] y se dice que está compuesta por acero laminado. La estructura se compone de 29 paneles que están unidos por la cuerda superior, la cuerda inferior, elementos diagonales, elementos horizontales, arriostres y el sistema de piso. Como se muestra en la Figura 3.

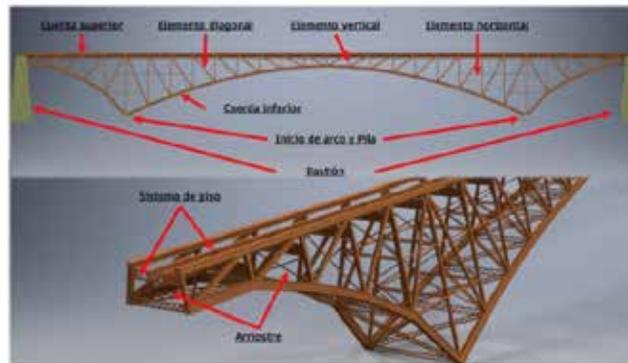


Fig. 3. Esquema del puente y elementos que lo componen.

3.3 Impresión 3D y estimación de costo

El proceso de impresión dio como resultado el modelo que se presenta en la Figura 4, es importante destacar que la modelación procuró ser fiel a la forma y dimensiones de las secciones y perfiles que componen el puente, con lo que logra tener un LOD 200 en su totalidad. Sin embargo, debido a que los perfiles estructurales poseían un espesor pequeño con relación al tamaño del puente, se procedió a aumentar el espesor del perfil. Lo que causó que el modelo impreso difiriera del real, sin alterar su apariencia y tamaño. Esto debido a que la dimensión mínima que es posible imprimir en la tecnología de FDM con boquilla 0.40 mm es de 0.50 mm.

Luego de finalizar el proceso de impresión, se estimó; con base en los costos de energía, material, depreciación del equipo, mantenimiento del equipo y la mano de obra; que el modelo tiene un valor aproximado de ₡ 252,020.19. Es importante destacar que el 70% del costo está asociado al costo de mano de obra, si se lograra disminuir dicho costo se podría abaratar el costo del prototipo.



Fig. 4. Modelo a escala reducida del puente ferroviario sobre el Río Grande de Atenas

IV. DISCUSIÓN

El realizar el modelo en 3D del puente significó un reto debido a la falta de información sobre la geometría y dimensiones de las secciones del puente. Sin embargo, una vez que se dio con un plano antiguo del perfil lateral del puente y algunos planos transversales, con los que Solano elaboró los planos del puente, la tarea de modelado se vio simplificada. Pero, debido a las características geométricas del puente, este representó un reto de igual manera.

La impresión 3D del modelo, con la técnica FDM, fue la tarea que presentó la mayor cantidad de inconvenientes, desde la familiarización con el equipo hasta problemas del firmware de la impresora, pasando por todas las pruebas que se efectuaron para obtener un modelo de calidad. Destaca la complejidad del modelo, secciones esbeltas con espesores pequeños son un reto en la impresión FDM, esto se debe a que durante la extrusión el equipo realiza cierta presión sobre las piezas y si estas no son resistentes pueden llegar a fallar. De igual manera, las secciones debían tener un grosor al imprimir mínimo de 0.4 mm. Esto era imposible de cumplir con el modelo real, debido a que el espesor máximo que tenían las secciones reales del puente era de 2.30 cm en la cuerda superior. Al aplicarle la escala de impresión del puente, este espesor era 0.23 mm. Lo que provocaba que al enviar la pieza a imprimir esta omitiera las secciones que no podían ser impresas. Al simplificar el modelo, aumentando el grosor de los perfiles estructurales, se logró mantener la forma y estética de la cercha del puente.

V. CONCLUSIONES

1. Acorde a la investigación histórica, fue considerado al finalizar su construcción como el puente más alto y largo construido en América. Con una altura máxima de 105 m y una longitud de 209 m. Las capacidades de los ingenieros de la época resultan destacables, pues con el bajo desarrollo tecnológico que existía en esos momentos lograron desarrollar una obra de gran magnitud y complejidad que ha perdurado en el tiempo.
2. A partir del esfuerzo realizado en la modelación e impresión 3D se concluye que es viable realizar un modelo 3D de un puente con las características del puente ferroviario sobre Río Grande de Atenas. De esto se obtuvo como resultado una pieza de exhibición de 2.09 m de largo que cumple con un nivel de detalle LOD 200.
3. Con base en la experiencia vivida por el autor al realizar el proyecto, se estima que es factible utilizar la impresión 3D para apoyar la labor de enseñanza, ya que con ella se puede recrear algunos experimentos de física e ingeniería que demuestren los efectos de las fuerzas sobre los objetos o que faciliten el pensamiento en tres dimensiones.
4. El desarrollo del modelo realizado en este trabajo arroja valiosas lecciones aprendidas respecto al uso de los equipos de impresión 3D. La impresión 3D de este tipo de estructuras con piezas de espesores delgados y de gran longitud, Es recomendable realizarla en tecnología de impresión tipo SLA o DLP, las cuales presentan más resolución y menor uso de soportes.

5. El costo y plazo de impresión obtenido en el proyecto permite contar con una primera aproximación que indica que es viable utilizar la impresión 3D como se planteó en el objetivo. De igual manera, el método de estimación y cálculo, planteado en el trabajo del que se deriva el artículo, resulta apropiado y práctico para estimar los principales costos del modelo impreso.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica que abra una línea de estudio que combine las investigaciones sobre patrimonios arquitectónicos, con las nuevas tecnologías de escáner 3D e impresión 3D.
2. Es importante preservar la mayor parte del patrimonio histórico del país. Por ello, recomendando a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica que por medio de los docentes haga llegar investigaciones relacionadas a los mismos con organismos como el Ministerio de Cultura y Juventud de Costa Rica.

VII. REFERENCIAS

- [1] C. Hall, "La expansión de los transportes en Costa Rica," *Revista geográfica de América Central*, vol. Vol 2, no. N° 3, pp. 9–26, 1975, Accessed: jul. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2070>
- [2] M. Cruz, "Puente Río Grande de Atenas," *Universidad de Costa Rica*, 1998.
- [3] K. M. Bast, "Feasibility Study of Leonardo da Vinci's Bridge Proposal over the Golden Horn in Istanbul Signature redacted," Massachusetts, jun. 2019. Accessed: jul. 12, 2022. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1721.1/123216>
- [4] AIA (American Institute of Architects), "Project building information modeling protocol form. AIA Document G202-2013," 2013.
- [5] R. Solano, "Análisis estructural del puente ferroviario sobre Río Grande de Atenas.," TFG, Universidad de Costa Rica, San José, 2021.
- [6] M. Saenz, *Los Ferrocarriles en Costa Rica*, 1st ed., vol. 1. San José: Imprenta del Comercio, 1911.
- [7] F. Skinner, *Types and Details of Bridge Construction: Arch Spans*. 1904.
- [8] MILLIKEN BROTHERS, *Useful Information And Tables Relative To Steel, Iron And Other Products For Buildings And Bridges.*, 2°. New York: Milliken Brothers, 1905. Accessed: jul. 12, 2021. [Online]. Available: <https://archive.org/details/thiscataloguecon00mill/page/n462/mode/1up>

Evaluación de interacciones del robot Pepper en actividades académicas de la Universidad de Costa Rica

Evaluation of Pepper robot interactions in academic activities at the University of Costa Rica

Kryscia Ramírez-Benavides

*Investigadora, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, UCR
correo electrónico: kryscia.ramirez@ucr.ac.cr
Código Orcid 0000-0003-0946-0196*

Adrián Vega Vega

*Investigador, Centro de Investigaciones en Tecnologías de la Información y Comunicación, UCR
correo electrónico: adrian.vegavega@ucr.ac.cr*

Ariel Mora Jiménez

*Investigador, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, UCR
correo electrónico: ariel.mora@ucr.ac.cr*

*Samantha Romero Pérez, Estudiante, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática, UCR
correo electrónico: amantha.romero@ucr.ac.cr*

Keyla Smith Arias,

*Estudiante, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática,
correo electrónico: keyla.smith@ucr.ac.cr*

Lizeth Corrales Cortés

*Estudiante, Escuela de Ciencias de la Computación e Informática,
correo electrónico: lizeth.corrales@ucr.ac.cr*

Palabras clave:

Actividades académicas, Cuestionario Godspeed, Cuestionario UTAUT, Interacción Humano-Robot, Usabilidad.

Keywords:

Academic activities, Godspeed Questionnaire, UTAUT Questionnaire, Human-Robot Interaction, Usability.

I. INTRODUCCIÓN

La Interacción Humano-Robot (HRI, por sus siglas en inglés) estudia la interacción entre humanos y robots en múltiples entornos, por lo que ha recibido un gran interés en la última década, siendo un campo multidisciplinario con contribuciones de la Interacción Humano-Computador,

Inteligencia Artificial, Procesamiento del Lenguaje Natural, diseño y ciencias sociales [1]. Esta disciplina relativamente nueva ha atraído mucha atención debido a la creciente exposición de las personas a los robots en su vida cotidiana [2]–[4].

Dado que se espera que los robots estén disponibles en múltiples tipos de entornos, las interacciones sociales con los humanos juegan un papel esencial donde se espera que los robots demuestren una interacción física segura y confiable, sigan las normas sociales y muestren comportamientos socialmente aceptables.

Los investigadores a menudo se refieren a los robots como agentes artificiales con capacidades de percepción y acción en un espacio de trabajo definido en el mundo físico y su uso se generalizó en las fábricas; pero actualmente se encuentran con mayor frecuencia en las sociedades más avanzadas tecnológicamente y expanden su usabilidad en dominios críticos como misiones de rescate, uso militar, detección de minas, exploración científica, cumplimiento de la ley, entretenimiento, atención hospitalaria, entre otros [2]–[5]. Un caso de esto es la robótica de servicio, que lleva a robots autónomos a entornos compartidos con personas [6], pero el aspecto social de estas tareas aún es mínimo, donde las personas son tratadas como obstáculos para navegar, en lugar de seres sociales con los que cooperar.

Considerando la interacción básica actual, surge la necesidad emergente de crear sistemas robóticos que interactúen con personas y otros agentes (robots) en su entorno durante actividades diarias más complejas y comunes. Aunque la capacidad del robot para interactuar con las personas es limitada, se está fomentando el desarrollo de sistemas robóticos con un estilo cada vez más realista y socialmente sofisticado.

El objetivo de este estudio es:

Evaluar el uso y la aceptación del robot durante actividades académicas, cuyas tareas han sido programadas por los investigadores, en la población estudiantil de la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática.

En la Escuela de Ciencias de la Computación e Informática (ECCI) y el Centro de Investigaciones en Tecnologías de la Información y Comunicación (CITIC), de la Universidad de Costa Rica, la HRI es uno de los temas de investigación actuales, utilizando robots como asistentes personales [7], [8] o como presentadores [9], [10], [11]. Por lo que, el presente estudio expone los resultados obtenidos en diversas actividades organizadas para la evaluación de la interacción de un robot Pepper [12] con presentadores humanos y estudiantes en un entorno académico. Las interacciones se presentaron en dos actividades diferentes:

1. Un grupo de estudiantes de la ECCI interactuando físicamente con la robot y los presentadores en una actividad social de charadas y trueque. En dónde la robot realiza la actividad, imitando diferentes animales, instrumentos musicales y deportes, esperando que los estudiantes adivinaran para asignarles puntos (les decía si acertaban o no). Por último, en el trueque, les intercambiaba premios por puntos a los estudiantes (obtenidos en las charadas).
2. Un grupo de estudiantes de la ECCI interactuando físicamente con la robot y la presentadora en un taller sobre las capacidades de la robot Pepper: habilidades autónomas,

conversación, movimiento, percepción y aprendizaje. La presentadora explicaba cada capacidad de Pepper y la robot mostraba un programa de ejemplo.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación fue el Diseño Centrado en el Usuario (UCD, por sus siglas en inglés) [5], [13], [14] que propone enfocar el diseño tecnológico en cómo las personas usan las tecnologías en lugar de solo en la tecnología en sí misma.

CUADRO I
ACTIVIDADES DE INTERACCIÓN HUMANO-ROBOT
DESARROLLADAS EN LA INVESTIGACIÓN.

Nombre	Descripción	Fechas de realización	Responsables (Coordinadores)	Participantes
Charadas y Trueque con Pepper	La actividad, dirigida a los estudiantes de la ECCI, consta de dos eventos: 1. Evento lúdico y social, organizado por equipos, para jugar adivinanzas (charadas) y realizar trueques con la robot Pepper. 2. Charla para explicar la parte técnica de la programación de Pepper y exponer sobre la economía social solidaria (trueques) en nuestro país.	Semana del 14 al 18 de marzo, 9am-11am Miércoles 23 de marzo, 10am- 12md	Docentes: Prof. Kryscia Ramírez Benavides Prof. Yasy Morales Chacón ^{<?>} Estudiantes (asistentes): Samantha RomeroPérez Keyla Smith Arias Lizeth Corrales Cortés José Pablo Campos Solaño ^{<?>}	30 estudiantes: 16 hombres 14 mujeres Edades entre 17 y 25 años
Capacidades de Pepper	Charla (tipo taller) dirigido a los estudiantes de la ECCI, donde colaboradores mostrarán las diferentes capacidades del robot Pepper. Cada capacidad se explica y se ejemplifica con un programa.	Miércoles 20 de abril, 9am-12md Miércoles 11 de mayo, 9am-12md	Docente: Prof. Kryscia Ramírez Benavides Estudiantes (asistentes): Samantha RomeroPérez Keyla Smith Arias Lizeth Corrales Cortés	8 estudiantes: 4 hombres 4 mujeres Edades entre 17 y 22 años 7 estudiantes: 2 hombres 5 mujeres Edades entre 17 y 25 años

En el Cuadro I se muestra para cada actividad: una breve descripción, las fechas de realización, los responsables (coordinadores) y los participantes del estudio. Los participantes son estudiantes de la ECCI y fueron reclutados a través de un formulario de inscripción enviado a través del correo electrónico institucional donde se describían y explicaban las actividades.

Se utilizó el robot Pepper en las actividades, este es un robot humanoide social de SoftBank Robotics [12]. Tiene 120cm de altura y 28Kg de peso, cuenta con 20 grados de libertad para movimientos naturales y expresivos, módulos de percepción y reconocimiento de voz para reconocer e interactuar con personas, realización de diálogo en 15 idiomas, sensores para interacciones multimodales y navegación autónoma.

Además, para mediar las variables que permiten cumplir con el objetivo se utilizaron los cuestionarios estandarizados:

- UTAUT. Marco teórico que fue creado para evaluar la aceptación y uso de tecnologías. Integra elementos de otras teorías como la teoría de la acción razonada, el modelo de motivación, la teoría de la cognición social y la teoría de la difusión de la innovación, entre otras. Este cuestionario evalúa variables como la intención de uso, el disfrute percibido, la sociabilidad percibida y la confianza. [15]
- Godspeed. Instrumento estandarizado en el campo HRI traducido a múltiples idiomas, que está respaldado por investigaciones previas multiculturales. Mediante el uso de escalas diferenciales semióticas, este cuestionario evalúa la percepción que los usuarios tienen de los robots en constructos clave de HRI como: el antropomorfismo, la animicidad, la simpatía y la inteligencia percibida. [16]

III. RESULTADOS

En las actividades se comenzó a encontrar la confiabilidad (fiabilidad) de los cuestionarios estandarizados realizados y las respuestas obtenidas para ambas actividades, mediante el Análisis Alfa de Cronbach. Como se describe en el cuadro II, los resultados obtenidos de este análisis muestran una confiabilidad mayor a 0,7 en todos los cuestionarios, dando fiabilidad a los cuestionarios realizados y las respuestas obtenidas.

Luego, se realizó un análisis exploratorio de los datos obtenidos de los cuestionarios UTAUT y Godspeed para ambas actividades, los resultados se observan en las tablas III y IV, se agrupó de acuerdo con el sexo de los participantes. Para cada variable de los cuestionarios se utilizó una escala tipo Likert con parámetros entre 1 y 5, considerando 5 como el valor más alto. En el cuadro III se muestran los resultados obtenidos del cuestionario UTAUT y en el cuadro IV los resultados del cuestionario Godspeed.

Los diferentes constructos (variables) de UTAUT describen una percepción positiva de la interacción con Pepper en ambas actividades, mostrando una aceptación y uso del robot para este tipo de actividades. De acuerdo con el Cuadro III, el mayor valor identificado fue IU ($M = 4,823$, $SD = 0,358$ para la actividad Charadas y Trueque con Pepper; $M = 4,956$, $SD = 0,117$ para la actividad Capacidades de Pepper), seguido de un PE elevado, un PS, y una T consistente.

CUADRO II
ANÁLISIS ALFA DE CRONBACH DE LOS CUESTIONARIOS ESTADARIZADOS UTAUT Y GODSPEED UTILIZADOS EN LAS ACTIVIDADES.

Actividad	Cuestionario Estandarizado	Sujetos	Ítems	Alfa de Cronbach	Valoración
Charadas y Trueque con Pepper	UTAUT	30	14	0,880	Bueno
	Godspeed		20	0,935	Excelente
Capacidades de Pepper	UTAUT	15	14	0,789	Aceptable
	Godspeed		20	0,857	Bueno

CUADRO III
ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS ACTIVIDADES UTILIZANDO UTAUT

Variable	Sexo	Charadas y Trueque con Pepper				Capacidades de Pepper			
		N	Media	SD	SE	N	Media	SD	SE
Intención de uso (IU)	Masculino	16	4,730	0,442	0,110	6	4,889	0,172	0,070
	Femenino	14	4,929	0,193	0,052	9	5,000	0,000	0,000
	Total	30	4,823	0,358	0,065	15	4,956	0,117	0,030
Disfrute percibido (PE)	Masculino	16	4,575	0,399	0,100	6	4,933	0,163	0,067
	Femenino	14	4,800	0,477	0,128	9	4,756	0,477	0,159
	Total	30	4,680	0,444	0,081	15	4,827	0,384	0,099
Sociabilidad percibida (PS)	Masculino	16	4,297	0,440	0,110	6	4,500	0,447	0,183
	Femenino	14	4,482	0,654	0,175	9	4,500	0,354	0,118
	Total	30	4,383	0,548	0,100	15	4,500	0,378	0,098
Confianza (T)	Masculino	16	4,156	0,598	0,149	6	4,000	0,707	0,289
	Femenino	14	4,214	0,611	0,163	9	3,778	0,712	0,237
	Total	30	4,183	0,594	0,108	15	3,867	0,694	0,179

Por otra parte, los diferentes constructos (variables) de Godspeed describen una percepción positiva de la interacción con Pepper en ambas actividades, sobre el robot en sí mismo que sobre sus interacciones, mostrando una simpatía y atribuyendo cualidades humanas al robot en este tipo de actividades. De acuerdo con el cuadro IV, el mayor valor identificado fue Simpatía ($M = 4,640$, $SD = 0,774$ para la actividad Charadas y Trueque con Pepper; $M = 4,907$, $SD = 0,183$ para la actividad Capacidades de Pepper), seguido de Inteligencia percibida elevada, Animicidad y Antropomorfismo.

CUADRO IV
ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LAS ACTIVIDADES UTILIZANDO GODSPEED.

Variable	Sexo	Charadas y Trueque con Pepper				Capacidades de Pepper			
		N	Media	SD	SE	N	Media	SD	SE
Antropomorfismo	Masculino	16	3,038	0,538	0,134	6	4,133	0,575	0,235
	Femenino	14	3,457	0,991	0,265	9	4,022	0,380	0,127
	Total	30	3,233	0,797	0,145	15	4,067	0,451	0,117
Animicidad	Masculino	16	3,594	0,571	0,143	6	4,472	0,386	0,158
	Femenino	14	4,036	0,782	0,209	9	4,278	0,382	0,127
	Total	30	3,800	0,702	0,128	15	4,356	0,382	0,099
Simpatía	Masculino	16	4,675	0,399	0,100	6	4,867	0,163	0,067
	Femenino	14	4,600	1,073	0,287	9	4,933	0,200	0,067
	Total	30	4,640	0,774	0,141	15	4,907	0,183	0,047
Inteligencia percibida	Masculino	16	3,963	0,567	0,142	6	4,200	0,566	0,231
	Femenino	14	4,243	1,113	0,297	9	4,289	0,389	0,130
	Total	30	4,093	0,861	0,157	15	4,253	0,450	0,116

En ambos cuestionarios se llevó a cabo ANOVA para los diferentes constructos de cada uno, con el fin de ver si había diferencia significativa en estos constructos en relación con el sexo de los participantes. Tanto para UTUAT como Godspeed, no se encontró evidencia significativa de que existe diferencia de la percepción de los constructos en relación con la variable sexo. Es decir, tanto hombres como mujeres perciben de forma positiva la interacción con Pepper en el contexto de ambas actividades.

Dado que en la actividad de charadas y trueque con Pepper hubo una mayor interacción entre los participantes y el robot, los resultados del cuestionario UTAUT son menores a los obtenidos en la actividad de capacidades de Pepper, a excepción del constructo de confianza. El constructor de confianza (T) es mayor en la actividad de charadas y trueque con Pepper, dado que la información que el robot manejaba era en relación con un juego, mostrando mayor confianza de compartir y creer en ese tipo de información.

Del mismo modo, los resultados del cuestionario Godspeed en la actividad de charadas y trueque son menores a los obtenidos en la actividad de capacidades del robot. Ya que, al haber una mayor interacción entre las personas y el robot, se evaluó con mayor precisión la percepción al interactuar en el contexto de cada actividad.

IV. CONCLUSIONES

Esta investigación estudió el impacto de la interacción de un Pepper con estudiantes de la ECCI en dos actividades académicas y sociales utilizando los cuestionarios UTAUT y Godspeed.

El objetivo de la investigación se cumplió, ya que los resultados muestran una aceptación y uso positivo del robot en ambas actividades, en el contexto descrito para cada una, por la población estudiantil de la ECCI.

Asimismo, este estudio muestra que al interactuar de forma más constante y cercana las personas con el robot, se evaluará con mayor precisión la percepción de la interacción en un contexto determinado. Aunque, se necesita más investigación para respaldar estos hallazgos.

V. REFERENCIAS

- [1] C. Bartneck and M. Okada, "Robotic user interfaces," *Proceedings of the Human and Computer Conference (HC 2001)*, pp. 130–140, 2001.
- [2] E. Torta, J. Oberzaucher, F. Werner, R. H. Cuijpers, and J. F. Juola, "Attitudes Towards Socially Assistive Robots in Intelligent Homes: Results From Laboratory Studies and Field Trials," *J Hum Robot Interact*, vol. 1, no. 2, Jan. 2013, doi: 10.5898/JHRI.1.2.Torta.
- [3] J. Li, "The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents," *Int J Hum Comput Stud*, vol. 77, pp. 23–37, May 2015, doi: 10.1016/j.ijhcs.2015.01.001.
- [4] K. Dautenhahn, "Socially intelligent robots: dimensions of human–robot interaction," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 362, no. 1480, pp. 679–704, Apr. 2007, doi: 10.1098/rstb.2006.2004.
- [5] International Organization for Standardization, "ISO 13407:1999 Human-centred design processes for interactive systems," Jun. 1999. Accessed: Jun. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/21197.html>
- [6] D. M. Wilkes et al., "Toward socially intelligent service robots," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 12, no. 7–8, pp. 729–766, Oct. 1998, doi: 10.1080/088395198117604.
- [7] A. Vega, K. Ramírez-Benavidez, and L. A. Guerrero, "Tool UTAUT Applied to Measure Interaction Experience with NAO Robot," in *Human-Computer Interaction. Design Practice in Contemporary Societies. HCII 2019. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 11568, M. Kurosu, Ed. Springer, Cham, 2019, pp. 501–512. doi: 10.1007/978-3-030-22636-7_38.
- [8] A. Vega, K. Ramírez-Benavides, L. A. Guerrero, and G. López, "Evaluating the Nao Robot in the Role of Personal Assistant: The Effect of Gender in Robot Performance Evaluation," in *13th International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence UCAmI 2019*, Nov. 2019, p. 20. doi: 10.3390/proceedings2019031020.
- [9] J. Hernandez-Cedeño, K. Ramírez-Benavides, L. Guerrero, and A. Vega, "NAO as a Copresenter in a Robotics Workshop - Participant's Feedback on the Engagement Level Achieved with a Robot in the Classroom," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 784, Springer, Cham, 2019, pp. 143–152. doi: 10.1007/978-3-319-94346-6_14.
- [10] R. Madrigal Acuña, A. Vega, and K. Ramírez-Benavides, "Qbo robot as an educational assistant - Participants feedback on the engagement level achieved with a robot in the classroom," in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Jul. 2019, vol. 784, pp. 163–171. doi: 10.1007/978-3-319-94346-6_16.
- [11] S. Romero-Pérez, K. Smith-Arias, L. Corrales-Cortés, K. Ramírez-Benavides, A. Vega, and A. Mora, "Evaluating Virtual and Local Pepper Presence in the Role of Communicator Interacting with Another Human Presenter at a Vocational Fair of Computer Sciences," 2022, pp. 580–589. doi: 10.1007/978-3-031-05409-9_42.

- [12] SoftBank Robotics, “Pepper the humanoid and programmable robot,” SoftBank Robotics, 2022. <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper> (accessed Jun. 28, 2022).
- [13] Usability.gov Staff Writer, “With Measurable Usability Goals – We All Score,” *Usability.gov Staff Writer*, 2013. <http://www.usability.gov/get-involved/blog/2013/09/measurable-usability-goals.html> (accessed Jun. 13, 2014).
- [14] *Usability Engineering*. Elsevier, 1993. doi: 10.1016/C2009-0-21512-1.
- [15] M. Heerink, B. Kröse, V. Evers, and B. Wielinga, “Measuring acceptance of an assistive social robot: A suggested toolkit,” *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, no. June 2014, pp. 528–533, 2009, doi: 10.1109/ROMAN.2009.5326320.
- [16] C. Bartneck, D. Kulić, E. Croft, and S. Zoghbi, “Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots,” *Int J Soc Robot*, vol. 1, no. 1, pp. 71–81, Jan. 2009, doi: 10.1007/s12369-008-0001-3.