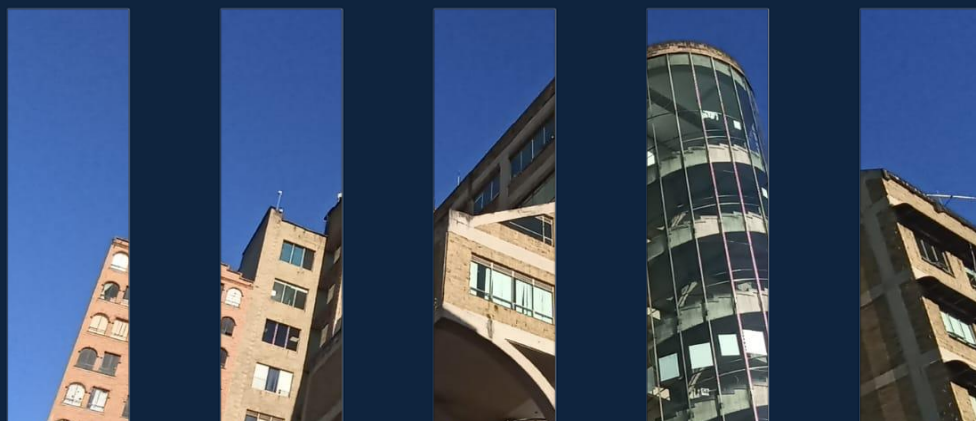


PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



ISSN: 3028-6727 (en línea)

Vol: 2

No.: 1

Year: 2023

Annual Volume



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Doctorado
en Ingeniería

<http://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co>

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D. – Ed.
Elvis Eduardo Gaona García Ph.D. – Ed.



PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING,
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
VOL 2 - 2023

Memorias de los eventos de la Facultad de Ingeniería
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
ISSN: 3028-6727 (en línea)

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Rector: Dr. Giovanni Tarazona

Vicerrectora Académica: Dra. Mirna Jirón Popova

Vicerrector Administrativo: Elverth Santos Romero

Decana Facultad de Ingeniería: Dra. Luz Esperanza Bohorquez

Director Doctorado en Ingeniería: Elvis Eduardo Gaona-García
Ph.D.

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.

Comité Científico

Germán Hernández Ph.D., Universidad Nacional de Colombia

Carlos Franco Ph.D., Universidad del Rosario

Lindsay Álvarez Pomar Ph.D., Universidad Distrital Francisco
José de Caldas

Álvaro David Orjuela Cañón Ph.D., Universidad del Rosario

Árbitros Volumen 2

Germán Mendez Giraldo Ph.D., Universidad Distrital Francisco
José de Caldas

Yesid Díaz M.Sc., Universidad de La Salle

Dr. Roman Neruda, Informatics Dept. Charles University Prague,
Czech Republic

Feizar Javier Rueda-Velazco Ph.D., Universidad Distrital
Francisco José de Caldas

Javier Arturo Orjuela-Castro Ph.D., Universidad Distrital
Francisco José de Caldas

Julio César Sandoval Eng., Universidad de La Salle

John Leonardo Vargas Mesa M.Sc., Universidad del Rosario

Diana Guzmán Ph.D. (C), Universidad Javeriana

Dr. Petra Vidnerova, Informatics Dept. Charles University Prague,
Czech Republic

Nelson Díaz Aldana Ph.D., Universidad Distrital Francisco José
de Caldas

Gestión Editorial

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Corrección de Estilo

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Diagramación y montaje de cubierta

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Imagen de portada

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Periodicidad

Anual

Dirección: Cra 7 # 40B- 53 – Semisótano administrativo, Bogotá D.C. – República de Colombia

Teléfono: (+57) 6013239300 Ext: 1419 – 1402

email: doctoradoing@udistrital.edu.co

Sitio web: <https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/memorias>

Prefacio

El auge de la IA y su relación con modelos y métodos de optimización y simulación ha sido importante en las últimas décadas. Desde el punto de vista de Ingeniería, la implementación computacional y aplicación de dichos modelos y métodos es relevante para el avance de la ciencia y el bienestar de la sociedad. De esta forma, los trabajos presentados en los diversos eventos organizados por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el año 2022 son una muestra de los avances que sus autores han aportado a la ciencia aplicada en campos como la IA, optimización y simulación con énfasis en diversos temas como matemáticas, neurociencias, bioingeniería, métodos y modelos de investigación de operaciones aplicados, entre otros. Todos los trabajos resumidos aceptados fueron revisados por un equipo de revisores y han pasado por un proceso editorial con el fin de compilar este segundo volumen que contiene dichos resultados de investigación.

Agradecemos al comité científico y el equipo de revisores por su ayuda incondicional en el proceso de revisión y aceptación de los trabajos. También agradecemos a los autores quienes son la piedra angular de este segundo volumen de abstracts y son los llamados a dar a conocer los desarrollos que se vienen dando en nuestra comunidad académica.

Diciembre 2023

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.
Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.
Editores

Índice general

Optimización

Interval optimisation problems and Monge-like properties	1
<i>Martin Cerný</i>	
Modelo IRP de evaluación de costos logísticos en pymes fabricantes de agroquímicos: caso de estudio en Sabana de Bogotá	3
<i>Oscar Ruiz y Eduyn López-Santana</i>	
Nonlinear Optimization in Geometric Road Design	9
<i>Marcela Perlaza, Bryan Castillo and Peter Thomson</i>	
Evaluación de Mercado P2P con Diferenciación de Producto para Implementación de Servicio Complementario en Multimicroredes	12
<i>Dagoberto Martinez-Polo, David Romero-Quete, Eduardo Mojica-Nava y Camilo A. Cortes</i>	
An iterative method for the multi-source interval uncertainty Inventory Routing Problem	18
<i>Carlos Franco and Juan Carlos Figueroa-García</i>	
Python Implementation of Type-2 Fuzzy Sets for Solving Job-Shop Scheduling Problem	21
<i>Juan Carlos Figueroa-García and Jhoan Sebastian Tenjo García</i>	

Inteligencia Artificial

Development of robotic hand controlled by Arduino IoT cloud with esp32	26
<i>Luana Stefany Moura dos Santos, Rafael Oliveira Campelo, Gabriel Barbosa Pinheiro, Rejane Cavalcante Sá Rodrigues and Yuri Mateus Santiago</i>	
Towards Precision Agriculture: Development of a Neural Network Model for Quality Classification of Melons	30
<i>João Pedro Mendes Albuquerque, Gabriela Teixeira Leite, Wellington Rafael Teixeira da Costa, Rejane Cavalcante Sá Rodrigues, Jorge Luiz Wattes Oliveira Junior and Tiago dos Santos Façanha</i>	

Simulación

Hidden dynamics enhance the stability of switched control systems	34
<i>Christian Erazo and Nelson L. Díaz</i>	

Simulación de aglomeraciones de domiciliarios usando lógica difusa	38
<i>José David Silva y Lindsay Alvarez Pomar</i>	

Aplicaciones

Modelo predictivo de la interacción Humano Estructura vertical en puentes peatonales	42
<i>Juan Aux, Bryan Castillo y Peter Thomson</i>	
Study of Robotic Hand Projects and Development of Low-Cost Prototype	47
<i>Gabriel Barbosa Pinheiro, Luana Stefany Moura dos Santos, Rafael Oliveira Campelo, Rejane Cavalcante Sá Rodrigues, Júlia Ferreira Alves and João Pedro Sales Ximenes</i>	
Aplicación Multi-experimental de una SHTR para el Desempeño Sísmico de una Edificación de Muros Delgados de Concreto Reforzado con Aislamiento en la Base	51
<i>Alejandro Artunduaga, Bryan Castillo, Peter Thomson y Johannio Marulanda</i>	
Análisis de la Interacción Humano-Estructura: Incorporando la Variabilidad An-tropométrica en Modelos Robustos	57
<i>Julian Calonge, Daniel Gomez y Albert Ortiz</i>	
Research on Social Impacts for the Wind Power Projects Management in La Guajira, Colombia	60
<i>Valentina Cardozo-Torres and Milton M. Herrera</i>	
Prototype of Electric Vehicle Drivetrain Emulation for Energy Regeneration Testing Using an Induction Machine	64
<i>Julian David Ontibon Velasquez, Nelson Leonardo Diaz Aldana and Javier Antonio Guacaneme Moreno</i>	
Desigualdades en los resultados de las pruebas Saber Pro - ¿Las afectó el CO-VID? Sonia E. Monroy, Carlos E. Moreno, Lina M. Prieto, Gabriel S. Riascos,	68
<i>Jarol S. Linares y Hernando Diaz</i>	
Design of a SFCC plant for the implementation of the project-based learning in a single control course	73
<i>E. S. Escobar-Ortiz, A. F. Guerrero-Guerrero and J. J. Paez-Rodriguez</i>	
Producción de pesticida a base de aceite de Neem	78
<i>María Alfonso y Ginna Trujillo</i>	

Ortesis para alineación de tibia con antecedentes de pseudoartrosis congénita y displasia fibrosa	82
<i>Maritza Campos, Laura Soler, Angie Diaz y Derian D. Espinoza</i>	
Management of Hydrogen Production Systems through Conversion of Electric Power: A Case Study	86
<i>Esteban Agudelo, Sara Echeverri, and Diego Mejía-Giraldo</i>	

Interval optimisation problems and Monge-like properties

Martin Černý

Department of Applied Mathematics

Charles University

Prague, Czech Republic

cerny@kam.mff.cuni.cz

Abstract—Many optimisation problems, e.g. the travelling salesman problem, are computationally difficult to solve in general. However, efficient algorithms can be found if we assume further properties. For other problems, e.g. the transportation problem, the presence of such properties lead to algorithmical speed ups. An instance of such properties are Monge-like properties and there is a vast research on their algorithmical aspects. All these results become useless when uncertainty in data occurs. It can be caused by data corruption, imprecisions in data measurement or by floating-point arithmetics.

These problems are often dealt with by encapsulating real values by real closed intervals and further working with them. In our work, we investigate the Monge-like properties under interval setting. First, we define two variants of the properties and spend some time analysing them. We present different characterisations and recognition algorithms. Second, we try to extend the well-known algorithmical aspects of the properties (for real values) into interval setting.

Index Terms—interval analysis, Monge matrix, transportation problem, TSP, Robinsonian matrix

I. INTRODUCTION

Given n cities and an $n \times n$ matrix C , the travelling salesman problem (TSP) asks for a *tour* of minimum overall cost, or equivalently,

$$\min_{\phi} \sum_{i=1}^n c_{i\phi(i)} : \phi \text{ is a cyclic permutation.}$$

Since TSP is NP-hard in general, polynomially solvable special cases are of great importance. For example, when the cost matrix C fulfills so-called *Monge property*

$$c_{ij} + c_{kl} \leq c_{il} + c_{kj} \quad (1)$$

for all $1 \leq i < k \leq n$, $1 \leq j < \ell \leq n$, the problem has polynomial solution. More specifically, if the cost matrix C of a (TSP) is Monge matrix, then the optimal tour can be determined in $O(n^2)$ [1].

There are many other problems such as transportation and flow problems, geometrical problems, matching problems, greedily solvable problems and problems from dynamic programming for which the Monge property provide algorithmical speed ups (for more, see [2]).

The first and the third author were supported by the grant P403-22-11117S of the Czech Science Foundation.

A somewhat similar property is the one of *Robinson* for real symmetric $n \times n$ matrices C defined as

$$c_{xz} \leq \min\{c_{xy}, c_{yz}\} \quad (2)$$

where $1 \leq x < y < z \leq n$. This property was originally studied in the context of chronological ordering of archeological deposits (see [3]), but was further applied in solving problems like unidimensional scaling problem [4], problems in psychology [5] [6], analysis of DNA sequences [7], and overlapping clustering [8] [9].

There are other properties similar to those mentioned above, e.g. *ultrametric*, *totally monotone*, *bottleneck Monge* (see [2]). A significant class of matrices are so-called *Monge permutable* matrices satisfying that there is permutation π of rows and columns of C , such that C_π (matrix C , where rows and columns are permuted according to π) is Monge. Similarly, one can define *Robinson permutable* (*Robinsonian*) matrices.

II. INTRODUCING UNCERTAINTY IN DATA

For most of the applications mentioned above, we introduce uncertainty in data by substituting real values by real closed intervals - instead of knowing a real value exactly, we know it is drawn from a certain range. Thus, we denote $\mathbf{C} \in \mathbb{IR}^{n \times n}$ an $n \times n$ *interval matrix* where $\mathbf{c}_{ij}$ are real closed intervals. Under the interval setting, we define for each property its interval generalisations. E.g. for the Monge property, we say that $\mathbf{C} \in \mathbb{IR}^{n \times n}$ has *strong Monge property*, if for every $C \in \mathbf{C}$, it holds C is Monge. Similarly, $\mathbf{C} \in \mathbb{IR}^{n \times n}$ has *weak Monge property*, if at least one $C \in \mathbf{C}$ is Monge.

Notice that if a real matrix C is Monge, it also has strong Monge and weak Monge property, thus both of these properties generalise the Monge property to interval setting. In terms of data, strong properties represent the case where no matter the actual values, we are sure the property of the real matrix is satisfied. Regarding the weak property, it might be the case that the actual values do not fulfill the property, however, the possibility is not completely denied. Both of types of these properties were previously proved to be exploited for construction of algorithms for problems in interval setting (see e.g. [10]).

Our research is divided into two consecutive steps. First, we analyse the interval properties - find different characterisations,

construct recognition algorithms and study their properties. After that, we want to proceed with exploiting this knowledge in construction of algorithms for interval variants of the problems mentioned above. As this is currently a work in progress research, we focus on the first step in this text.

III. OUR RESULTS

The first step is to be able to recognise if an interval matrix $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ satisfies a certain property. In our previous work [11], where we focused on Monge property, we showed that strong and weak Monge properties can be recognized in polynomial time. Specifically, if $\mathbf{C}$ satisfies

$$\bar{c}_{ij} + \bar{c}_{kl} \leq \underline{c}_{il} + \underline{c}_{kj} \quad (3)$$

for all $1 \leq i < k \leq n$, $1 \leq j < \ell \leq n$, it has the strong Monge property. This is equivalent with stating that two *corner matrices* $\uparrow C$ and $\downarrow C$, defined as

$$(\uparrow C)_{ij} = \begin{cases} \bar{c}_{ij} \\ \underline{c}_{ij} \end{cases}, (\downarrow C)_{ij} = \begin{cases} \underline{c}_{ij} \\ \bar{c}_{ij} \end{cases}, \text{ if } i + j \equiv \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (4)$$

are Monge. This results is quite common for the strong Monge-like properties and we have proved the same result employing corner matrices for the strong Robinson and the strong totally monotone property.

Regarding the weak Monge property, we were able to prove the recognition problem is polynomial by a reduction to linear programming problem. However, a faster algorithm or a different characterisation of this property remain an open problem. For the weak Robinson property, we were able to find a characterisation of form

$$\underline{c}_{uv} \leq \bar{c}_{xy} \quad (5)$$

for every $1 \leq u \leq x < y \leq v \leq n$, which can be employed in an construction of a recognition algorithm running in $O(n^2)$. The algorithm is quite simple - it starts in the upper right corner of the matrix $\mathbf{C}$ and in each step, for entry at position (i, j) , it selects $c_{i-1, j} \in \mathbf{c}_{i-1, j}$ and $c_{i, j+1} \in \mathbf{c}_{i, j+1}$ such that $c_{i-1, j} = \max\{c_{i, j}, \underline{c}_{i-1, j}\}$ and similarly $c_{i, j+1} = \max\{c_{i, j}, \underline{c}_{i, j+1}\}$ (for the initial step at $(1, n)$, we set $c_{1n} = \underline{c}_{1n}$). If the algorithm succeeds, the interval matrix has the weak Robinson property.

The recognition problem of Monge permutable and Robinsonian matrices is more challenging, because of the number of possible permutations one has to consider. Based on the algorithm by Deineko and Filonenko [12], we managed to generalise the algorithm for the strong Monge permutable property running in $O(n^2)$. A numerically faster algorithm was also derived for interval matrices $\mathbf{C}$ with non-trivial entries (the width of the intervals is nonzero). Regarding strong Robinsonian matrices, we managed to derive an $O(n^3)$ algorithm working for matrices with non-trivial entries. Many algorithms for the Robinsonian property of real matrices were presented (see e.g. [13], [14], [15], [16]), which might serve as an inspiration for a construction of an algorithm for interval matrices with non-trivial entries.

REFERENCES

- [1] P. C. Gilmore, E. L. Lawler, and D. B. Shmoys, "Well-solved special cases," In: The Traveling Salesman Problem, Chap. 4 pp. 87–143, 1985.
- [2] R. E. Burkard, B. Klinz, R. Rudolf "Perspectives of Monge properties in optimization," Discrete Applied Mathematics, vol. 70 pp. 95–161, 1996.
- [3] W. S. Robinson "A method for chronologically ordering archeological deposits," American Antiquity, vol. 16 pp. 293–301, 1951.
- [4] D. G. Kendall, "Seriation from abundance matrices," In: Mathematics in the archaeological and historical sciences, pp. 215–252, 1971.
- [5] L. Hubert, "Some applications of graph theory and related nonmetric techniques to problems of approximate seriation: the case of symmetric proximity measures," Br J Math Stat Psychol, vol. 27 pp. 133–153, 1974.
- [6] L. Hubert, P. Ararbie, J. Meulman "Graph-theoretic representations for proximity matrices through strongly-anti-Robinsonian or circular strongly-anti-Robinsonian matrices," Psychometrika, vol. 63 pp. 341–358, 1998.
- [7] B. Mirkin, S. Rodin "Graphs and genes," Springer, Berlin, 1984.
- [8] B. Fichet " Sur une extension de la notion de hiérarchie et son équivalence avec quelques matrices de Robinson," Actes des Journées de Statistique de la Grande Motte pp. 12–12, 1984.
- [9] B. Mirkin "Mathematical classification and clustering," Kluwer, Dordrecht, 1996.
- [10] M. Hladík, "Interval linear programming: A survey" Linear programming—new frontiers in theory and applications, 2012.
- [11] M. Černý "Interval matrices with Monge property," Applications of Mathematics, vol. 65 pp. 619–643, 2019.
- [12] V. G. Deineko, V. L. Filonenko "On the reconstruction of specially structured matrices," Aktualnyje Problemy EVM i programirovaniye, 1979.
- [13] P. Pr a, D. Fortin "An optimal algorithm to recognize Robinsonian dissimilarities," Journal of Classification, 2014.
- [14] M. Laurent, M. Seminaroti "A Lex-BFS-based recognition algorithm for Robinsonian matrices," Discrete Applied Mathematics, 2017.
- [15] D. Fortin "Robinsonian matrices: recognition challenges," Journal of Classification, 2017.
- [16] M. Laurent, M. Seminaroti "Similarity-First Search: a new algorithm with application to Robinsonian matrix recognition," SIAM Journal on Discrete Mathematics, 2017.

Modelo IRP de evaluación de costos logísticos en pymes fabricantes de agroquímicos: caso de estudio en Sabana de Bogotá

Oscar Ruiz¹ y Eduyn López-Santana²

Maestría en Ingeniería Industrial

Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

omruizb,erlopezs@udistrital.edu.co

Resumen—Las organizaciones y en especial las pymes tienen enormes desafíos en cuanto al desempeño logístico. El sector de agroquímicos y las pymes que conforman el mismo están involucradas en un entorno de competitividad complejo, dadas las características del mercado exterior y el tipo de competencia presente. En torno a estas problemáticas se propone un modelo de inventario-ruteo de múltiples periodos, para pequeñas empresas en la ciudad de Bogotá D.C., con distribución en la zona geográfica conocida como “Sabana de Bogotá”, considerando las características propias de la cadena de suministro de productos Agroquímicos y de las Pymes en Colombia. El modelo involucra dos eslabones de la cadena de suministro, fabricante y/o distribuidor y varios minoristas distribuidos geográficamente; la distribución se realiza con un vehículo de capacidad definida. Los objetivos del modelo se centran en minimizar los costos logísticos (Gestión de inventarios, ruteo y costo de oportunidad) y maximizar el beneficio de la organización, dadas las limitaciones prácticas de la red de suministro; el modelo pretende brindar mecanismos de evaluación que soporten las decisiones logísticas en Pymes del sector económico mencionado.

Palabras Clave—inventory routing problem, agrochemicals, multi-objective., multi-period. .

I. INTRODUCCIÓN

LA necesidad de las organizaciones en fortalecer sus procesos, buscando un desarrollo competitivo puede relacionarse con el desarrollo de las cadenas de suministro, dado que el éxito de las mismas incide en el crecimiento de sus integrantes, dentro de las actividades de las cadenas de suministro resaltan el abastecimiento, las operaciones y la distribución, por tanto un desarrollo de la cadena de suministro impacta directamente en el rendimiento de las empresas de fabricación, estas actividades impactan positiva o negativamente el costo de la cadena de suministro en la medida en que se controlan y gestionan [1], como se mencionó anteriormente dentro de las actividades críticas en la cadena de suministro, se encuentran los procesos de abastecimiento y distribución estos integran el transporte de materias primas, insumos y productos terminados entre organizaciones y clientes que se ubican dispersos geográficamente; este papel fundamental de

los procesos de transporte en las organizaciones tiene la característica de ser uno de los costos logísticos más elevados, impactando en gran proporción el precio de los productos [2]. Según cifras del departamento nacional de planeación los costos logísticos más altos están representados por el sector agropecuario, minería e industrial con un 22,3 %, 25,1 % y 12,7 % respectivamente [3].

Entendiendo la necesidad de establecer procesos de seguimiento y control que permitan optimizar los procesos claves de la cadena de suministro, se plantea la necesidad de generar herramientas que faciliten el análisis y mejora de los procesos mencionados, dichas herramientas deben relacionarse con el contexto organizacional a impactar, en esta medida el concepto de pymes (pequeñas y medianas empresas) toma valor y debe estar inmerso en ese entendimiento del contexto Colombiano, dada la importancia de las mismas en el tejido empresarial, según datos de la Cámara de Comercio de Bogotá, del total de empresas registradas y renovadas en 2019, el 91,4 % son microempresas, el 6,1 % pequeñas empresas y el 1,8 % medianas empresas [4], puesto que las mismas enfrentan entornos competitivos, con marcadas deficiencias respecto a las grandes empresas, dadas sus condiciones particulares de recursos limitados y estructuras simplificadas [5], el bajo manejo logístico en cuanto a canales de distribución y los volúmenes de producción son factores a evaluar en relación con las pequeñas y medianas empresas en el país [6].

La evaluación de las actividades logísticas de fabricación y distribución permite desarrollar escenarios analizados que visualicen los costos de las actividades relacionadas en la cadena de suministro, lo que facilita el proceso de toma de decisiones, de manera que se impacte de positivamente las organizaciones y por ende su competitividad [7]; la integración de la gestión de inventarios y transportes pueden arrojar beneficios específicos en disminución de los costos asociados [8].

II. REVISIÓN DE LITERATURA

La optimización tradicional es empleada en modelos que buscan minimizar costos operativos y en algunos se incorpora el costo ambiental de los procesos de distribución [9], [10], [11], [12], sumados a los modelos tradicionales resaltan los

¹ Oscar Ruiz. Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (correo electrónico: omruizb@udistrital.edu.co).

² Eduyn Lopez. Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia (correo electrónico: erlopezs@udistrital.edu.co).

modelos de [13], [14], [15] que integran la metodología de ramificación y corte como método de solución, los modelos buscan minimizar los costos logísticos integrando restricciones de entrega sobre las cuales se genera un costo de penalización; la siguiente clasificación presenta los modelos asociados a heurísticas como método de solución [16], [17], [18], [19], [20] entre ellas recocido simulado y variantes del mismo, el modelo de [21] integra un algoritmo codicioso, por su parte [22] desarrolla un modelo en base a una heurística de límite inferior, por último [23] se evalúan modelos con Búsqueda tabú con programación lineal entera mixta HAIR, los modelos integran restricciones relacionadas con las emisiones de gases de invernadero en los procesos de distribución y algunos integran trasbordos como estrategias de distribución, como características complementarias; en relación con modelos que integran metaheurísticas [24] presenta un algoritmo imperialista HICA SADE, mientras en [25], [26] los modelos desarrollan algoritmos genéticos NSGA-II MOICA, en los modelos de [27], [28], [29] se presentan algoritmos genéticos de proceso de mutación de cromosomas y en [30], [21] algoritmos genéticos de colonia de hormigas (ACO), el modelo presentado por [32] desarrolla una metaheurística de algoritmo de optimización de enjambres de partículas mejorado (IPSO), [33] presenta un Algoritmo de aceptación de umbral, [34] emplea un algoritmo (RVND) Búsqueda de vecindad variable, de manera similar en los modelos [35], [36], [37], [38], [39] se emplea el Algoritmo de búsqueda de vecindad VND y Algoritmo Beam Search y NEH, [40] Algoritmo genético híbrido y [41] Algoritmo genético de asignación; los últimos modelos integran métodos Híbridos [42] que integran optimización y simulación en su aporte investigativo.

III. CARACTERIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO

La cadena productiva de agroquímicos comprende principalmente la producción intermedia de fertilizantes, producción de abonos, la elaboración de plaguicidas, herbicidas y reguladores biológicos [43]. En el contexto Sudamericano y por ende en el entorno colombiano la estructura empresarial de las organizaciones de agroquímicos puede dividirse en empresas nacionales y empresas filiales de compañías multinacionales [43]. Como lo indica el informe de insumos agropecuarios del ministerio de agricultura, el mercado de plaguicidas en Colombia está estimado en 1.9 billones de pesos a nivel nacional, la importación de plaguicidas ya terminados e importación de ingredientes activos es la principal fuente de comercialización en el país, dichos ingredientes activos son la base de fabricación de los plaguicidas producidos en Colombia [44].

III-A. Costos de la cadena de suministro

Los costos asociados a la fabricación y comercialización de plaguicidas dependen en gran medida al costo del ingrediente activo, puesto que representan cerca del 65 % del costo total del producto [44], asociado a esto el desempeño logístico se puede relacionar con los costos de distribución, las cadenas de suministro se ven impactadas por los costos logísticos,

la encuesta nacional logística para el 2018 menciona como los costos logísticos a nivel general representan el 13.5 % de las ventas de las organizaciones y a su vez de dicho porcentaje el 46,5 % representa costos asociados a almacenamientos y 35.2 % al costo de transporte siendo los rubros más representativo a nivel logístico. La cadena de suministro de agroquímicos integra los costos logísticos ligados a la industria por pertenecer al contexto productivo del país y al sector agropecuario dada su cercanía a la cadena productiva agro-industrial, dichos costos logísticos están evaluados en 11.5 % y 12.8 % respectivamente; abordando de manera específica los costos logísticos a nivel de pymes el costo logístico promedio se acerca a 17.6 % en pequeñas empresas, lo que indica la deficiencia en el desarrollo de los procesos logísticos en organizaciones del tamaño mencionado.

III-B. Actores de la cadena de suministro

Dentro de la configuración de la cadena de suministro intervienen dos aspectos como lo mencionan [45], estos son los eslabones que la integran y los flujos a lo largo de la misma. Los eslabones que integran la cadena de suministro de agroquímicos están enmarcados en la cadena de comercialización de insumos agropecuarios, dentro de los cuales se pueden mencionar los siguientes eslabones:

- Productores-importadores
- Mega-distribuidores
- Pequeños almacenes
- Cliente final

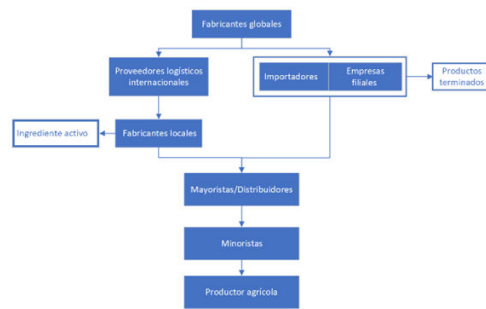


Figura 1. Estructura de la cadena de suministro Agroquímicos.

III-C. Fabricantes

Las organizaciones fabricantes de agroquímicos, se enfocan en la transformación de ingredientes activos importados en conjunto con diversos materiales en productos terminados [46], con el objetivo de cumplir las demandas de clientes distribuidores (mega-distribuidores y pequeños almacenes) que aprovisionan suministros agrícolas; según el listado de empresas comercializadoras o fabricantes de plaguicidas químicos de uso agrícola presentado por el ICA para el año 2022 se pueden listar 530 empresas registradas, que al comparar con la dinámica de agroquímicos presentados por [47] permite establecer la gran participación de pequeñas y medianas empresas en el sector, dado que se reconoce como 8 empresas lideran

el mercado de agroquímicos, aunque resaltan el dinamismo de múltiples organizaciones más.

Los fabricantes se enfocan en la producción entendiéndose como las actividades de transformación de la materia prima en los diferentes productos destinados a clientes y la distribución intermedia de los productos, en base a la estructura presentada por [48] que plantea que los procesos de distribución integran los diferentes procesos asociados al flujo de productos desde proveedores hasta clientes, la cadena de agroquímicos involucra intermediarios minoristas y mayoristas; por lo tanto el papel de los fabricantes integra el despacho de sus productos a bodegas almacenadoras o a distribuidores directos en las diferentes regiones del país [49].

III-D. Mayoristas y Minoristas (Comercializadores)

Los clientes directos de los fabricantes de plaguicidas y agroquímicos, son empresas constituidas que surten el papel de comercialización de los diferentes productos enfocados en soportar los procesos agroindustriales, el rol primordial de dichas organizaciones es proveer insumos a los productores agrícolas, dentro de estas se pueden mencionar las organizaciones floricultoras, la estructura de comercialización de los principales productos agroquímicos (Abonos Químicos, Fertilizantes, Fungicidas y Plaguicidas), en Colombia y por tanto en la sabana de Bogotá está basada en el proceso de intermediación de distribuidores localizados en puntos estratégicos. El papel de los clientes directos por tanto en la cadena de suministro de agroquímicos es la comercialización de dichos productos a clientes finales (productores agrícolas) [45].

III-E. Productor Agrícola

Los plaguicidas como los demás agroquímicos hacen parte de los insumos y/o materias primas involucradas en los procesos agroindustriales, como se mencionó anteriormente, el abastecimiento de los establecimientos de comercio de agroquímicos se enfoca en el cumplimiento de las necesidades de los productores agrícolas en relación con el objeto de los plaguicidas [50], dichos productores agrícolas son generalmente dueños de haciendas o fincas, el contexto propio de los productores (tierras cultivadas y capacidad adquisitiva) establece su proporción y tamaño de compra, presentando clientes con volúmenes grandes de compras y pequeños productores que poseen pequeñas hectáreas de tierra que compran en menor cantidad insumos agrícolas [51]; por tanto la ubicación geográfica y los volúmenes de producción son determinantes para el acceso de los clientes finales a agroquímicos como los plaguicidas.

El sector económico agroindustrial asociado al altiplano cundiboyacense, zona geográfica que engloba los departamentos de Boyacá y Cundinamarca dentro de estos la sabana de Bogotá, comprende los sectores económicos que se pueden definir como clientes finales o productores agrícolas de las organizaciones fabricantes de agroquímicos, estos pueden vincularse con procesos de transformación industrial relacionadas con ganadería, procesos avícolas, floricultores, cultivo de hortalizas y tubérculos [52].

Dentro de los clientes finales de la cadena de agroquímicos resalta para el presente proyecto de investigación el sector floricultor, que tiene un aporte del 72 % como cluster dentro de la sabana de Bogotá a la producción nacional [52].

IV. MODELO PROPUESTO Y FORMULACIÓN

El modelo considera una red de distribución para un producto formulado en la ciudad de Bogotá, desde una planta de fabricación con capacidad de almacenamiento definida que cumple el papel de punto de partida, a un set de clientes (minoristas) dispersos geográficamente en la sabana de Bogotá, en un horizonte temporal que contempla múltiples periodos; la estructura del modelo incorpora un vehículo con capacidad definida que realiza la entrega de producto, el modelo pretende evaluar la configuración de gestión de inventarios y ruteo que minimice el costo logístico total y maximice el beneficio de la organización, dentro del modelo se estiman demandas definidas para los minoristas, en ese sentido se determina un costo de penalización por el incumplimiento de dichas demandas en el modelo de distribución, la figura 2 representa la red de distribución definida para pymes del sector de Agroquímicos.

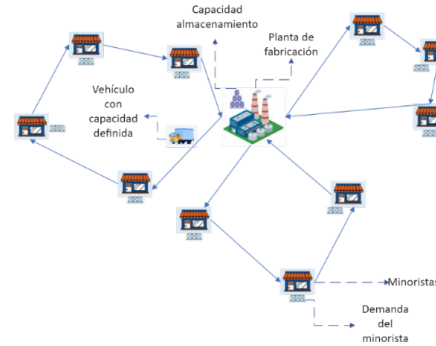


Figura 2. Red de distribución pymes de agroquímicos.

El modelo usa la notación que se presenta a continuación, en base a los modelos desarrollados por Arab, et al [25] y Hu, et al [27].

Conjuntos

V_p = Nodo productor, donde $p = \{0\}$

V_c = Conjunto de clientes, donde $C = \{1, 2, \dots, n\}$

T = Periodos $t = \{1, 2, \dots, T\}$

Parámetros

C_{ij} : Costo (unitario) asociado al recorrido entre los nodos i, j , para todo $i, j \in V \mid i \neq j$

Cap: Capacidad de almacenamiento de la planta de fabricación

Co: Costo de oportunidad por unidad insatisfecha de producto

CK : Capacidad de carga del vehículo

d_i^t : Demanda del cliente tipo i en el periodo t

h : Costo de mantenimiento de inventario en la planta de fabricación

a_{ij} : Distancia entre nodos i y j en kilómetros

Mo: Margen aportado por el producto por unidad

B : Nivel de inventario inicial en la planta de fabricación

PR_t : Capacidad de producción de la planta por periodo

Variables de decisión

I_t : Inventario disponible al final del periodo t en la planta

Q_{it} : Cantidad de producto entregado al cliente i

X_{ijt} : Variable binaria, toma el valor de 1 si se cubre el recorrido entre el nodo i y j en el periodo t .

P_t : Cantidad de producto fabricado por planta en periodo t

dn_{it} : Demanda insatisfecha del cliente tipo i en el periodo t

IV-A. Modelo matemático

Basado en la notación presentada el modelo se enfoca en la siguiente formulación:

$$\text{Min } F_1 = \sum_{t \in T} hI_t + \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} c_{ij} X_{ijt} + \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} dn_{it} * CO \quad (1)$$

$$\text{Max } F_2 = \sum_{i \in V} \sum_{t \in T} Q_{it} * (Mo - c_{ij}) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$I_t = I_{t-1} + p_t - \sum_{i,j \in V} \sum_{t \in T} Q_{ijt} - d_{it} + dn_{it} \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (3)$$

$$I_t \leq Cap \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} X_{ijt} - \sum_{i \in V, i \neq j} X_{jit} = 0 \quad \forall j \in C \mid 0, \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} X_{ijt} \leq 1 \quad \forall i, j \in C, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V, i \neq j} X_{0jt} \leq 1 \quad \forall i, j \in C, \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} Q_{it} \leq CK \quad \forall i \in C, \forall t \in T \quad (8)$$

$$P_t \leq PR_t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} X_{iht} - \sum_{j \in V} X_{hjt} = 0 \quad \forall h \in V, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j \in V} X_{0ht} = 1 \quad \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{j \in V} X_{iVt} = 1 \quad \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{i,j \in S} X_{ijt} \leq |S| - 1, S \subseteq \{1, \dots, n\} \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$2 \leq |S| \leq n - 1;$$

$$X_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in C, \forall t \in T \quad (14)$$

$$Q_{itA} \geq 0, \quad \forall i, j \in C, \forall t \in T \quad (15)$$

$$I_t \geq 0, \quad \forall t \in T \quad (16)$$

En el modelo la primera función objetivo está definida por la ecuación (1) en la cual se relacionan los costos asociados al manejo de inventarios en la planta de fabricación, la distribución de productos hacia clientes distribuidores y el costo de oportunidad por el incumplimiento en las demandas. La ecuación (2) está asociada al segundo objetivo del modelo maximizar el margen de contribución de la cadena, dada

por la diferencia entre el margen operacional y el costo de distribución multiplicado por la cantidad distribuida. La restricción (3) hace referencia al balance de inventario del producto en la planta de fabricación, para el modelo en específico el inventario inicial $I_0 = B$, lo que indica que el inventario en el periodo $t = 0$ es un valor conocido previamente. La restricción (4) plantea la limitación dada por la capacidad de almacenamiento de la planta en cada periodo t . La restricción (5) garantiza la conservación de flujo en cada periodo. La restricción (6) garantiza que se realice solo una ruta por periodo t . La restricción (7) restringe a la planta de fabricación como el nodo inicio de la ruta. La restricción (8) indica que la planeación de distribución no debe superar la capacidad de carga del vehículo. La restricción (9) indica que la producción de cada periodo de tiempo no debe superar la capacidad de la planta de fabricación. La restricción (10) modela el flujo en cada arco. La restricción (11) y (12) indican el inicio y el fin de las rutas en la planta de fabricación respectivamente. La restricción (13) pretende eliminar los "subtours". Las restricciones (14) a la (16) están asociadas a no negatividad y propias de las variables de decisión.

V. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio pretende contextualizar el entorno de la cadena de suministro de las pequeñas y medianas empresas fabricantes y comercializadoras de agroquímicos, mediante la modelación en base a la investigación asociada a la cadena de suministro mencionada y los datos recopilados en una empresa ubicada en la ciudad de Bogotá con distribución a la zona geográfica conocida como la "Sabana de Bogotá", la cadena evaluada se compone de dos niveles comúnmente presentes en este tipo de organizaciones, una fábrica que cumple el papel también de centro de distribución y un conjunto de clientes, esta estructura se asocia a la necesidad de minimizar los procesos de intermediación que minimiza los costos logísticos [53].

Las operaciones logísticas se gestionan desde dos niveles (i) la gestión de inventarios en base a las capacidades propias de las organizaciones y la estructura de costos. (ii) La distribución desde la fábrica hasta los diferentes clientes de acuerdo con las demandas propias de los mismos. El objetivo de la empresa es encontrar la solución óptima en cuanto a rutas de distribución y manejo de inventarios para cada período.

El modelo se centra en un producto comercializado por la organización (Molusquicida) cuyo foco estratégico de comercialización es la Sabana de Bogotá, dadas las características propias de la zona geográfica que facilitan el proceso de reproducción de la plaga a controlar (Babosas y Caracoles) [54], los municipios involucrados en el modelo se presentan en la tabla I, para la distribución de producto se dispone de un vehículo con capacidad limitada (2,5 ton), el modelo involucra costos de gestión de inventarios, costos de penalización por incumplimientos de las demandas de los diferentes clientes y costos asociados a la distribución, en la tabla II se presentan las demandas por periodo de tiempo (mes) dictaminadas por las necesidades de los diferentes clientes y la capacidad productiva de la fábrica; en relación con la capacidad de almacenamiento

de inventario la planta cuenta con una capacidad nominal de 7000 unid.

Tabla I
UBICACIONES GEOGRÁFICAS CLIENTES

Ubicación Geográfica
BOGOTÁ D.C
CAJICA
COTA
EL ROSAL
FACATATIVA
FUNZA
LA CALERA
MADRID
TABIO
TENJO
ZIPAQUIRA

Tabla II
DEMANDA GLOBAL POR PERIODO Y CAPACIDAD OPERATIVA

Periodo	Demanda en Unidades	Capacidad productiva en Unidades
t1	6194	6938
t2	1672	9063
t3	6003	10125
t4	9499	8000
t5	10381	9281
t6	8905	9063
t7	12842	8219
t8	10644	9281
t9	6831	9594

VI. RESULTADOS PARCIALES

El modelo matemático presentado en la sección 2 se encuentra en desarrollo, sin embargo como presentación de resultados parciales se resolvió el modelo de gestión de inventarios mediante un método exacto empleando el software GAMS, cuyos resultados facilitaran el entendimiento del contexto y la elección del método de solución acorde a las necesidades que conlleva el modelo de distribución complementario, en esta medida los resultados preliminares permiten identificar un reto dentro de la organización en establecer mecanismos para minimizar la demanda insatisfecha que se presenta y como al involucrar los procesos de distribución se impactara el costo total logístico y en especial el costo de penalización mencionado, además de restringir el modelo en cuanto a la capacidad de distribución dada por la capacidad de distribución (capacidad del vehículo y tipo de ruteo generado) disponible. Una vez se desarrolle el modelamiento complementario de la gestión de distribución o ruteo se tendrán que evaluar escenarios que permitan a las organizaciones tener un panorama amplio para la toma de decisiones, en el presente avance se presentaran los resultados parciales en cuanto a las variables claves del problema que permitan orientar el trabajo en pro de establecer métricas globales que impacten positivamente la toma de decisiones de empresas del sector.

La tabla III permite identificar cual es el cumplimiento parcial de las demandas de los clientes.

La tabla IV resalta los valores parciales de las funciones objetivas evaluadas, en relación con los costos asociados a la gestión de inventarios y costos de penalización y la segunda

Tabla III
DISTRIBUCIÓN POR PERIODO

Periodo	Unidades distribuidas
t1	2438
t2	1672
t3	6003
t4	8000
t5	9281
t6	8905
t7	8219
t8	9281
t9	6831

Tabla IV
RESUMEN DE COSTOS DE GESTIÓN DE INVENTARIOS E INGRESOS POR MARGEN DE UTILIDAD

Función Objetivo	Valor
Costo de gestión de inventario y penalización	\$ 135,747,500
Utilidad según margen operacional	\$ 553,832,500
Utilidad antes de distribución	\$ 418,085,000

permite aproximar un primer valor de ingresos de utilidad de la empresa por la fabricación y comercialización del producto

Tabla V
INCUMPLIMIENTO EN UNIDADES POR PERIODO

Periodo	Incumplimiento en Unidades
t2	7391
t3	4122
t6	158
t9	2763
t11	1551

Por último, se presenta la relación de demanda insatisfecha generada en el escenario evaluado de acuerdo con las demandas propias de los clientes.

REFERENCIAS

- [1] T. Sawik, «Integrated supply, production and distribution scheduling.» Omega, Vol. 62, pp. 131-144, 2016.
- [2] C. Mehaca, Optimizar costos de distribución a través de una gestión más eficiente, Bachelor's thesis, 2021.
- [3] DNP, «A 12,6 % cayeron los costos logísticos de las empresas frente a sus ventas.» 27 06 2021. [En línea]. Available: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/A-12,6-cayeron-los-costos-logisticos-de-las-empresas-frente-a-sus-ventas.aspx>.
- [4] Cámara de Comercio de Bogotá, «Cámara de comercio de Bogotá.» 12 2019. [En línea]. Available: <https://www.ccb.org.co/Sala-de-prensa/Noticias-CCB/2019/Diciembre-2019/Aumento-14-el-numero-de-empresas-creadas-en-Bogota-y-la-Region>.
- [5] C. A. B. Leyva, A. J. Cavazos y J. E. E. Blanco, «Influencia de la planeación estratégica y habilidades.» Contaduría y Administración 63, pp. 1-21, 2018. technica, vol. 22, no. 4, pp. 341-344, 2017.
- [6] J. F. Salinas, «Problemática que afrontan las pequeñas y medianas empresas en Colombia por falta de un sistema de control.» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá DC, 2013.
- [7] A. Muñoz y D. Díaz, Diseño de un modelo de costos logísticos en empresas PYME, 2011.
- [8] C. Archetti y M. G. Speranza, «The inventory routing problem: the value of integration.» International Transactions in Operational Research, 23(3), pp. 393-407, 2016.
- [9] D. He, Q. Zhong, Y. Qu, P. Du y Z. Lin, «A green approach for a bi-objective programming inventory routing problem.» International Journal of Research and Surveys, 10, pp. 1375-1381, 2016.
- [10] A. Abdelhalim, A. Eltawil y M. N. Fors, «The multiple vehicle inventory routing problem for perishable products.» In 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), pp. 1169-1173, 2015.

- [11] S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem y Y. Reikik, «Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach,» *International Journal of Production Economics*, 157, pp. 80-88, 2014.
- [12] A. Rahimi, A. Baboli y F. Jolai, «Modeling a production-inventory-routing problem for perishable items under uncertainty of machines and routes,» *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, pp. 656-668, 2014.
- [13] C. M. Defalque, A. F. da Silva y F. A. S. Marins, «Goal programming model applied to waste paper logistics processes,» *Applied Mathematical Modelling*, 98, pp. 185-206, 2021.
- [14] C. Archetti, M. G. Speranza, M. Boccia, A. Sforza y C. Sterle, «A branch-and-cut algorithm for the inventory routing problem with pickups and deliveries,» *European Journal of Operational Research*, 282(3), pp. 886-895, 2020.
- [15] C. Archetti, O. Jabali y M. G. Speranza, «Multi-period vehicle routing problem with due dates,» *Computers & Operations Research*, 61, pp. 122-134, 2015.
- [16] S. Sherif, P. Asokan, P. Sasikumar, K. Mathiyazhagan y J. Jerald, «Integrated optimization of transportation, inventory and vehicle routing with simultaneous pickup and delivery in two-echelon green supply chain network,» *Journal of Cleaner Production*, 287, p. 125434, 2021.
- [17] M. Rahbari, B. Naderi y M. Mohammadi, «Modelling and solving the inventory routing problem with CO2 emissions consideration and transshipment option,» *Environmental Processes*, 5(3), pp. 649-665, 2018.
- [18] F. Ramadhan, A. Imran y A. F. Rizana, «A record-to-record travel algorithm for multi-product and multi-period inventory routing problem,» In 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. (pp. 274-278), IEE, 2018.
- [19] F. Etebari y N. Dabiri, «A hybrid heuristic for the inventory routing problem under dynamic regional pricing,» *Computers & Chemical Engineering*, 95, pp. 231-239, 2016.
- [20] H. Shaabani y I. N. Kamalabadi, «An efficient population-based simulated annealing algorithm for the multi-product multi-retailer perishable inventory routing problem,» *Computers & Industrial Engineering*, 99, pp. 189-201, 2016.
- [21] N. Thinakaran, J. Jayaprakash y C. Elanchezhian, «Greedy algorithm for inventory routing problem in a supply chain-A Review,» *Materials Today: Proceedings*, 16, pp. 1055-1060, 2019.
- [22] K. R. Preethi, C. Rajendran y S. Viswanathan, «Mathematical models and lower bounds for an inventory routing problem with backorders,» *Proceedings of International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*, 2018.
- [23] C. Archetti, L. Bertazzi, A. Hertz y M. G. Speranza, «A hybrid heuristic for an inventory routing problem,» *INFORMS Journal on Computing*, 24(1), pp. 101-116, 2012.
- [24] A. Ghasemkhani, R. Tavakkoli-Moghaddam, Y. Rahimi, S. Shahnejat-Bushehri y H. Tavakkoli-Moghaddam, «Integrated production-inventory-routing problem for multi-perishable products under uncertainty by meta-heuristic algorithms,» *International Journal of Production Research*, 60(9), pp. 2766-2786, 2022.
- [25] R. Arab, S. Ghaderi y R. Tavakkoli Moghaddam, «Bi objective inventory routing problem with backhauls under transportation risks: two meta-heuristics,» *Transportation Letters*, 12(2), pp. 113-129, 2020.
- [26] R. Arab, S. F. Ghaderi y R. Tavakkoli-Moghaddam, «Solving a new multi-objective inventory-routing problem by a non-dominated sorting genetic algorithm,» *International Journal of Engineering*, 31(4), pp. 588-596, 2018.
- [27] H. Hu, J. Li, X. Li y C. Shang, «Modeling and solving a multi-period inventory fulfilling and routing problem for hazardous materials,» *Journal of systems science and complexity*, 33(3), pp. 760-782, 2020.
- [28] C. Cheng, M. Qi, X. Wang y Y. Zhang, «Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations,» *International Journal of Production Economics*, 182, pp. 263-275, 2016.
- [29] R. Dhanalakshmi, P. Parthiban, K. Ganesh y T. Arunkumar, «Genetic algorithm to solve multi-period, multi-product, bi-echelon supply chain network design problem,» *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management (IJISSCM)*, 2(4), pp. 24-42, 2009.
- [30] N. H. Moin y L. Wong, «Population based ant colony optimization for inventory routing problem,» *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, 2014.
- [31] L. Wong y N. H. Moin, «A modified ant colony optimization to solve multi products inventory routing problem,» In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1605, No. 1, pp. 1117-1122), American Institute of Physics., 2014.
- [32] I. N. Kamalabadi, S. H. Zegordi y A. H. Mirzaei, «Developing an improved particle swarm optimization algorithm for solving the inventory routing problem with direct shipment,» In 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 221-225), IEEE, 2011.
- [33] F. Ramadhan, A. R. I. F. Imran y A. F. Rizana, «Threshold based algorithms for the multi-product multi-period inventory routing problem,» *J. Eng. Sci. Technol.*, 14(5), pp. 2703-2715, 2019.
- [34] I. T. Peres, H. M. Repolho, R. Martinelli y N. J. Monteiro, «Optimization in inventory-routing problem with planned transshipment: A case study in the retail industry,» *International Journal of Production Economics*, 193, pp. 748-756, 2017.
- [35] B. Vahdani, S. T. A. Niaki y S. Aslanzade, «Production-inventory-routing coordination with capacity and time window constraints for perishable products: Heuristic and meta-heuristic algorithms,» *Journal of cleaner production*, 161, pp. 598-618, 2017.
- [36] A. Mjirda, B. Jarboui, R. Macedo, S. Hanafi y N. Mladenović, «A two phase variable neighborhood search for the multi-product inventory routing problem,» *Computers & Operations Research*, 52, pp. 291-299, 2014.
- [37] A. Mjirda, B. Jarboui, R. Macedo y S. Hanafi, «A variable neighborhood search for the multi-product inventory routing problem,» *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, pp. 91-98, 2012.
- [38] N. H. Moin y H. Z. Halim, «Enhanced Neighborhood Structure for Multi Periods Inventory Routing Problem Model with Time Varying Demand,» In *Computers and Industrial Engineering* 42, 2012.
- [39] N. H. Moin, «Optimization of multi periods Inventory Routing Problem model with time varying demand,» In 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 190-194), IEEE, 2011.
- [40] N. H. Moin, S. Salhi y N. A. B. Aziz, «An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem,» *International Journal of Production Economics*, 133(1), pp. 334-343, 2011.
- [41] N. A. B. Aziz y N. H. Mom, «Genetic algorithm based approach for the multi product multi period inventory routing problem,» In 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 1619-1623), IEEE., 2007.
- [42] S. Prakash y I. Mukherjee, «An Enhanced Solution Strategy for Multi-period Multi-component Product Inventory Routing Problem Considering Supply Failure Risks,» In 2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), pp. (pp. 411-416), IEEE., 2021.
- [43] M. M. Chávez Escudero, *Modelo de logística inversa bajo la metodología Scor para reducir el tiempo del flujo de una empresa agroquímica.*, 2017.
- [44] A. V. Pinzón, «Política Agropecuaria y de Desarrollo Rural 2018-2022,» 2019.
- [45] L. A. Oviedo Vargas y N. V. Rodríguez Zaidiza, *Caracterización de la cadena de abastecimiento de rosas en Colombia*, 2009.
- [46] L. F. Carvajal, «Gestión de la cadena de suministro en la comercialización de productos agrícolas en Ecuador,» *SUMMA. Revista disciplinaria en ciencias económicas y sociales*, 3(2), pp. 1-23, 2021.
- [47] L. Ortegón Cortazar, «Imagen y posicionamiento de marcas en la industria de agroquímicos en Colombia,» *Revista Lasallista de investigación*, 14(1), pp. 13-28, 2017.
- [48] M. Manrique, J. Teves, A. Taco y J. Flores, «Gestión de cadena de suministro: una mirada desde la perspectiva teórica,» *Revista venezolana de gerencia*, 24(88), pp. 110-130, 2019.
- [49] G. A. García Gómez y H. J. Reyes Sotelo, «Farm-Chemicals sa planta formuladora y productora de agroquímicos,» *Estudios Gerenciales*, 18(83), pp. 91-103, 2002.
- [50] A. Gutiérrez, *Determinación de los factores críticos de éxito para la implementación de BPM: estudio de caso para la Cadena de Suministro de una empresa del Sector Floricultor*, 2017.
- [51] F. Arias quesada y C. Boquín Cole, *Fortalecimiento empresarial de la cadena de suministros en la industria agropecuaria en san marcos de colón*, 2015.
- [52] Sectorial, «Especial Oportunidades Colombia: La Sabana de Bogotá,» 13 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.sectorial.co/articulos-especiales/item/57189-especial-oportunidades-colombia-la-sabana-de-bogot>
- [53] J. F. Caicedo Díaz del Castillo, «La intermediación como un impedimento al desarrollo del pequeño productor de Medellín,» *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(1), pp. 27-32, 2013.
- [54] L. Castellanos, J. Serrano y W. M. Becerra, «Preferencia por morfoespecies de babosas en diferentes cultivos y ambientes del municipio Pamplona, Norte de Santander,» *Revista ambiental agua, aire y suelo*, 2020.

Nonlinear Optimization in Geometric Road Design

Marcela Perlaza , Bryan Castillo and Peter Thomson
School of Civil Engineering, Universidad Del Valle, Cali, Colombia.
[clara.perlaz](mailto:clara.perlaz@correounivalle.edu.co), [bryan.castillo](mailto:bryan.castillo@correounivalle.edu.co), [peter.thomson](mailto:peter.thomson@correounivalle.edu.co)

Abstract—This article presents the first phase of designing software for the parametric optimization of the geometric layout of a road using nonlinear optimization algorithms in MATLAB. The main objective is to minimize costs while considering the criteria that restrict the design parameters. Initially, a mathematical model of road geometry was constructed using a Fourier series to obtain the optimal coordinates for the route between two selected geographical points. For the testing phase, points from three different types of terrain were utilized: one generated by the Peaks function, a flat terrain, and a mountainous terrain. These terrains exhibit altitude variations, resulting in distinct road geometries. Furthermore, the latter two were compared with their respective real roads, and it was found that the proposed road on flat terrain was approximately 0.44% longer than the actual road, whereas for mountainous terrain, the road geometry was similar, but the route coordinates differed significantly.

Index Terms—Real- road, software, optimization.

I. INTRODUCTION

IN various fields of civil engineering, such as hydraulics, wind engineering, geotechnics, and transportation, complexities arise owing to the presence of variables with nonlinear relationships. Particularly in transportation engineering, which considers multiple factors for road design and construction, precise modeling and the quest for efficient routes pose significant challenges. To address these challenges, nonlinear optimization [1] has been widely employed, allowing the consideration of intricate parameters and realistic constraints. Computational tools, including optimization software and programming languages, play a pivotal role in furnishing algorithms and numerical methods that streamline the process of seeking optimal or approximate solutions through calculations and data processing.

In this context, Jha et al. (2006) [2] underscored the significance of employing innovative methods for road design that optimize horizontal alignments and swiftly evaluate layout alternatives. Similarly, Kang et al. (2013) [3] introduced a method for optimizing the alignment of road geometric designs to minimize vehicle fuel consumption. Shafahi et al. (2013) [4] explored the utilization of a customized particle swarm optimization algorithm to search for a near-optimal highway alignment, comprising several tangents, consisting of circular curves (for horizontal design) and parabolic curves (for vertical alignment).

Within the scope of this study, a software application aimed at optimizing road routes was developed. Initially, it considers the allowable road slope, which is influenced by factors such as the maximum speed and the type of road to be constructed. The software is designed with adaptability, enabling the assessment and presentation of various optimization choices in line with user specifications and preferences. To accomplish



Fig. 1. Road segment, flat terrain. (2023). Google.com.

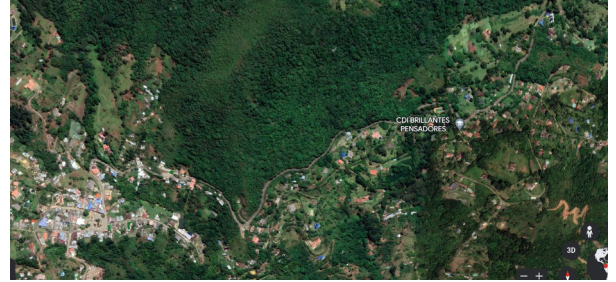


Fig. 2. Road segment, mountainous terrain (2023). Google.com

this, advanced algorithms are employed to evaluate all possible route combinations and determine the optimal route based on predefined criteria. In addition, it boasts an intuitive and user-friendly interface, allowing users to input specific preferences and constraints while generating multiple route alternatives.

II. ACADEMIC EXAMPLES

The development of the initial model began by incorporating the "peaks" function from MATLAB as a reference before proceeding to the testing phase. This function generates a simulated landscape with peaks and valleys, assigning elevation values to each point within its domain. Consequently, it offers a visually descriptive representation of the data.

For the subsequent test, we selected two points in Santiago de Cali along Carrera 80, situated between Calles 13 and 16, with a distance of 1139 meters between them. These points were connected to a secondary road with a maximum allowable speed of 50 km/h (Fig. 1). This choice provides us with a reference point, given the relatively low variability in altitude within the city. Consequently, we anticipate that the software will propose a straight route similar to the actual road.

In the final test of the initial model, we selected a secondary road with a speed limit of 60 km/h. This road extends from the municipality of Felidia to El Saladito (Fig. 2), both located

in a mountainous area characterized by significant variations in altitude within Valle del Cauca. Due to these conditions, we anticipate that the software-generated road will exhibit a more complex geometry.

III. DESIGN

The program seamlessly integrates two programming languages, Python and MATLAB, each renowned for their extensive libraries and specialized tools in the fields of science and engineering. By leveraging the strengths of both languages in tandem, it delivers a robust suite of capabilities for data analysis, processing, and visualization, enhancing the overall functionality. [5].

Python, renowned for its versatility and extensive functionality, serves as a robust platform for accessing altitude data across diverse geographical locations on Earth. The seamless integration of Python with the Google Cloud Platform's Elevation API enables precise elevation data retrieval. Python acts as the foundation for developing an intuitive user interface and ensuring efficient data management within the program. This allows users to interact effortlessly with the software, selecting starting and ending points on a map, specifying road types, and defining maximum speed limits in accordance with the Geometric Design Manual for Roads [6]. These parameters are pivotal in determining the optimal slope for each road segment.

TABLE I
ABBREVIATIONS

X_0	Starting point longitude coordinate
X_f	Ending point longitude coordinate
t	Evaluation point $X_0 < t < X_f$
x	Decision variable. (Vector of 100 terms initialized to 0)
penMax	Maximum slope

TABLE II
OPTIMIZATION PARAMETERS

An	$x(1 : 50)$	Bn	$x(51 : 100)$
Φ	$\sum_{n=1}^{50} \frac{(n*t)*\pi}{X_f}$		
α	$An * \sin(\Phi)$		
r	$Bn * \sin(\Phi)$		
$\mathbf{x}$	$r * \cos(\alpha)$		
$\mathbf{Y}$	$r * \sin(\alpha)$		
$\mathbf{F}(x)$	$\int_0^L \sqrt{(\nabla X)^2 + (\nabla Y)^2 + (\nabla Z)^2} dF$		
$C(x)$		$\leq pe$	ax

IV. OPTIMIZATION

After passing the end coordinates and maximum allowable slope to MATLAB, the optimization process was carried out using the FMINCON function. This function is employed to find the minimum of an objective function while adhering to a set of nonlinear equality and inequality constraints. Its purpose is to identify optimal values for decision variables

that minimize the objective function while meeting specified constraints.

In this initial stage, the study prioritized the optimization of road length, recognizing it as a fundamental and foundational aspect. This prioritization was based on the understanding that other optimization options depend on this core measure. To accurately represent the geometric shape of the route, particular attention was devoted to the common scenario of a road featuring compound curves.

It is widely recognized that compound curve roads do not exhibit a linear relationship between the coordinates defining their trajectory under any circumstance. Consequently, a parametric mathematical formulation was employed to precisely describe the intricate shape and specific properties inherent to such compound-curved roads. This approach allowed the model to incorporate the necessary parameters, thus accommodating the geometric complexity and the variable nature of compound curves within the road network.

To represent the curve in this case, the required coordinates consist of latitude (Y), longitude (X), and altitude (Z). The parameters Y and X describe the trajectory of the curve. To accurately represent these functions, sinusoidal and cosine functions were utilized due to their amplitude property, which provides control over the scale and extension of the curve in different directions. In this context, these values simulate the curve radius at each point along the route.

Considering the previously mentioned details, it was necessary to mathematically represent the values of radius (r) and angle (α) for each parameter. This was accomplished by using a sine series multiplied by their respective Fourier coefficients. These coefficients are derived from vectors containing x values obtained using the FMINCON function.

Your explanation is clear, but I'll provide a slightly refined version for additional clarity and flow:

The angles (Φ) for the series are determined by sequence matrices, which play a crucial role in the summation evaluation. These matrices were defined based on the path's endpoints and the desired number of points to evaluate for trajectory determination. For each point along the path, Φ was calculated based on its position relative to the endpoints. These Φ values were then employed to evaluate the sine function and multiply it by the coefficients r and α . To obtain the (X, Y) coordinates of the path, the r and α vectors are multiplied and evaluated within the sine and cosine parametric functions. Tables I and 2 provide variable abbreviations and parameter definitions for the optimization, respectively.

During the testing phase, an approach was employed to improve the efficiency of the optimization process. In this approach, the altitude data (Z) was obtained from a geographically referenced map in TIFF image format, covering an extensive area of the Valle del Cauca region. This map was directly imported into the MATLAB programming environment, granting access to the Z values associated with each pixel representing a location within the area of interest. This eliminates the need to consult external sources or perform additional calculations to obtain the required altimetry information. Once the testing phase is completed, elevation data is obtained through a function implemented in the Python programming

language, providing the corresponding altitude value for any point on the Earth's surface, obtained from the Google Cloud Platform Elevation API. This optimized approach ensures the efficient acquisition of elevation data necessary for road design and enables precise altitude determination in any geographic area.

V. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the test conducted with the terrain generated by the Peaks function are shown in Fig.3 This figure shows that the software optimizes the route to avoid crossing the peaks of the terrain while minimizing the distance traveled. In the second test, given the relatively minor variations in

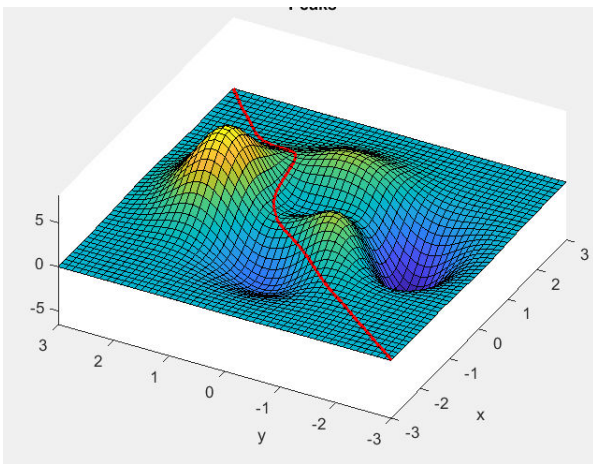


Fig. 3. Result of Peaks function. MATLAB (2023)

the altitude in Cali, the software proposed a straight route as the optimal solution. The length of the proposed road was 1144 m, which was only 0.44% longer than that of the actual road. The graphical results presented in Fig. 4 indicate that the road reached a maximum elevation of 986 m and a minimum elevation of 972 m.

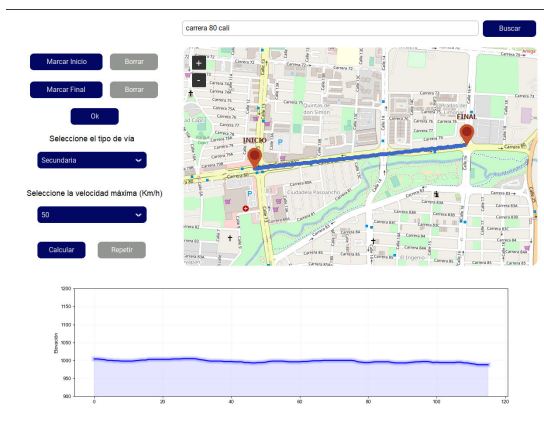


Fig. 4. Road on flat Terrain

In the final test conducted on mountainous terrain, it was observed that the road generated by the software exhibited a geometry similar to that of the actual road, as depicted in Fig. 5 Owing to the slope restrictions, the software was unable to

propose a straight route, which is consistent with challenging terrain conditions. The road reaches a maximum altitude of 2100 m and a minimum altitude of 1700 m. These significant variations in altitude reflect the mountainous topography of the area and contribute to the complexity of the road geometry.

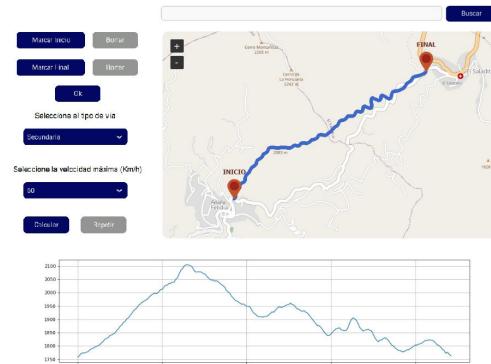


Fig. 5. Road on mountainous terrain

VI. PERSPECTIVE AND FUTURE WORKS

Subsequent tests revealed a significant challenge faced by FMINCON when confronted with low slope constraints and a substantial degree of altitude variability within the user-selected point area. This challenge has hindered FMINCON's ability to produce accurate optimization results. Consequently, the routes generated and transmitted back to Python exhibited significant deviations and lacked a coherent logical structure.

To effectively address this problem, it is imperative to conduct a comprehensive reassessment of the modeling approach used for the X- and Y-coordinates. The primary goal of this reassessment was to enhance the algorithm's proficiency in identifying and determining optimal and logically consistent routes.

Various optimization criteria have been considered for future improvements to meet diverse needs. These criteria include minimizing the travel distance, reducing costs [7], and decreasing the travel time. These optimization options are adjusted based on established constraints, which range from the topographic characteristics of the terrain to the economic requirements of construction and road speed limits.

REFERENCES

- [1] Vázquez-Méndez, M. E., Casal, G., Santamarina, D., & Castro, A. (2018). A 3D model for optimizing infrastructure costs in road design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 33(5), 423-439.
- [2] Jha, M. K., Jha, M. K., Schonfeld, P. M., & Jong, J. C. (2006). *Intelligent road design* (Vol. 19). WIT press.
- [3] Kang, M. W., Shariat, S., & Jha, M. K. (2013). New highway geometric design methods for minimizing vehicular fuel consumption and improving safety. *Transportation research part C: emerging technologies*, 31, 99-111.
- [4] Shafahi, Y., & Bagherian, M. (2013). A customized particle swarm method to solve highway alignment optimization problem. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(1), 52-67.
- [5] Haider, L., Baumgartner, M., Hayn, D., & Schreier, G. (2022, May 16). Integration of Python Modules in a MATLAB-Based Predictive Analytics Toolset for Healthcare. *ResearchGate*; unknown.
- [6] Murgueitio, A. (2008). "Manual de Diseño Geométrico de Carreteras". Invías.
- [7] Jong, J.-C., & Schonfeld, P. (1999). Cost Functions for Optimizing Highway Alignments. *Transportation Research Record*, 1659(1), 58-67.

Evaluación de Mercado P2P con Diferenciación de Producto para Implementación de Servicio Complementario en Multimicroredes

Dagoberto Martinez-Polo¹, David Romero-Quete², Eduardo Mojica-Nava³, y Camilo A. Cortes⁴

Resumen—El presente artículo expone la formulación de un algoritmo de gestión energética de múltiples microrredes. El cual se fundamenta en un mercado peer-to-peer que incorpora una diferenciación de productos. Para abordar eficazmente este desafío, se emplea una combinación de teoría de consenso e innovación. Esta solución resuelve de manera distribuida el problema, aprovechando la comunicación entre los diversos agentes involucrados. Además, abre la posibilidad de integrar un servicio complementario de respuesta ante sobrefrecuencias proporcionado por microrredes. Esto es especialmente relevante en áreas no interconectadas como Puerto Carreño, donde el generador síncrono principal presenta limitaciones dinámicas significativas en situaciones de alivio de carga.

Palabras clave—Confiabilidad, Diferenciación de producto, Mercados de energía, Microred (MG), Multi-microredes (MMG), Optimización distribuida, Peer-to-peer (P2P), Servicios auxiliares

I. INTRODUCCIÓN

TRADICIONALMENTE, a causa de la naturaleza jerárquica de los sistemas de potencia convencionales, las decisiones operativas en relación al óptimo despacho de potencia han sido tomadas de forma centralizada por un único agente [1]. Sin embargo, en años recientes, la evolución de los sistemas de potencia hacia redes inteligentes con agentes distribuidos en las redes de distribución, impulsada por el desarrollo de interfaces de electrónica de potencia que facilitan la conexión de sistemas generadores a partir de fuentes renovables no convencionales de energía, es inminente. La aparición de microrredes (MG, por sus siglas en inglés) se vislumbra como una alternativa prometedora para cambiar el paradigma del flujo unidireccional de potencia. Esto proporciona confiabilidad, resiliencia y robustez a las redes, además de mejorar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental y disminuir los costos operativos, especialmente en sistemas respaldados por combustibles fósiles tradicionales y en áreas rurales [2]–[4].

Una MG se define como un agente activo dentro de las redes de distribución, conformada por componentes como cargas, unidades de generación distribuida y sistemas de almacenamiento, capaces de operar tanto de forma aislada como conectada [5]. Por otro lado, un sistema de multi-microrredes (MMG, por sus siglas en inglés) se define como una estructura de nivel superior, formada en la media tensión, que consiste

en varias MG y unidades de generación distribuida conectadas mediante alimentadores adyacentes de media tensión. En este sistema, las MG, las unidades de generación distribuida y las cargas pueden considerarse como agentes que interactúan activamente en el sistema de potencia [6].

La creación de sistemas de MMG plantea varios desafíos, destacando la necesidad de un sistema de gestión de energía (EMS, por sus siglas en inglés) que tome en cuenta los intereses de los agentes involucrados en el mercado, como generadores, operadores de red, MG operadas por entidades con objetivos diferentes y la demanda [7]. Esto da lugar a un problema de optimización de asignación de recursos que ha sido abordado desde diversos enfoques, como se observa en las revisiones literarias realizadas en [2], [4], [8], [9]. Entre los enfoques prominentes se encuentran los sistemas jerárquicos, tanto centralizados como distribuidos.

En un esquema centralizado, el EMS posee información detallada sobre la red y las MGs (rampas de toma de carga y descarga de los generadores distribuidos, tiempos mínimos de operación y salida, carga y descarga de sistemas de almacenamiento, etc.), que utiliza para formular y resolver un problema de optimización para el despacho óptimo. Aunque estos enfoques exhiben una arquitectura de control simplificada, donde un controlador central asume total responsabilidad de la operación del sistema, esta ventaja se ve empañada por limitaciones en escalabilidad y flexibilidad en sistemas más grandes y complejos. Necesitando requisitos mayores de comunicación y computación, lo que podría generar desconfianza de los usuarios a la hora de compartir información confidencial. Además, la dependencia del controlador central convierte a este en un punto único de vulnerabilidad, repercutiendo negativamente en la robustez del sistema [4], [7]. A pesar de estas implicaciones, vale resaltar que los enfoques centralizados han sido ampliamente estudiados, tal como se destaca en [9]. Por otro lado, en [6] se proponen EMS centralizados jerárquicos para sistemas de MMG.

En contraste, los esquemas distribuidos logran un despacho óptimo a través de decisiones individuales tomadas por cada MG, lo que resulta en un intercambio de información más limitado y una complejidad computacional reducida [7], [10]. En otras palabras, el problema global de asignación óptima de recursos se descompone en partes resueltas localmente por cada agente, buscando maximizar su propio beneficio mediante la interacción e intercambio de información con sus pares. Esto conduce a una mayor confiabilidad en caso de fallas de comunicación en la red.

^{1,4} D. Martinez-Polo, D. Romero-Quete, E. Mojica-Nava y C. Cortes están afiliados al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (e-mail: dmartinezp@unal.edu.co; dfromeroq@unal.edu.co; eamojican@unal.edu.co; caacortesgu@unal.edu.co).

Se han propuesto diversos algoritmos para resolver problemas en sistemas multiagente (MAS, por sus siglas en inglés). En [11] se presentan aplicaciones de la teoría de juegos evolutivos poblacionales en este tipo de sistemas, donde cada agente elige una estrategia óptima considerando las opciones de los demás. Un ejemplo de aplicación en EMS se expone en [12], logrando un óptimo despacho de potencia mediante un algoritmo de control transactivo de dos niveles. En la primera etapa, el operador de red optimiza localmente el precio de la energía y lo comunica a las MG del sistema. Luego, las MG optimizan distribuidamente aplicando la teoría de dinámica del replicador y la teoría de juegos evolutivos, alcanzando el equilibrio de Nash y maximizando el beneficio social.

Los algoritmos basados en protocolos de consenso son ampliamente utilizados en la solución de MAS debido a su estructura simple [5]. En este tipo de enfoques, los agentes acuerdan conjuntamente el estado final del sistema, ajustando sus parámetros en función de la información compartida [5], [13]. Propuestas de EMS que emplean el protocolo de consenso se encuentran en [14], donde se aborda un problema de optimización de dos niveles similar al planteado en [12]. Por otro lado, en [3], se incorpora la posibilidad de intercambiar potencia entre MGs interconectadas cuando hay déficit de generación. Además, en [15], se considera la respuesta de la demanda ante las señales de precio de la energía, buscando maximizar el beneficio social mediante la interacción entre los diferentes agentes.

Existen variaciones del protocolo de consenso, como el algoritmo "consenso + innovación", en el que cada agente actualiza el valor de su copia local de la variable en la que se busca consenso, considerando un término adicional llamado "innovación", que representa el conocimiento individual de cada agente sobre una porción del sistema [16]. En [1], [17], este término adicional se plantea como la inyección o el consumo que realiza el agente en cada iteración, lo que logra un equilibrio de potencia entre generación y demanda.

Además, en el contexto de Sistemas Multiagentes (MAS), han surgido propuestas de mercados de energía descentralizados de tipo "peer to peer" (P2P), donde los generadores distribuidos y la demanda desempeñan un papel activo de acuerdo a sus preferencias, permitiéndoles comerciar sus recursos sin depender de una entidad central [18]. En el estudio de [19], se presenta un esquema de mercado P2P que incorpora el concepto de diferenciación de producto. Esto implica asignar un valor dinámico a aspectos adicionales de la electricidad más allá de su contenido energético. En otras palabras, se comercializa energía diferenciada en función de características específicas como la fuente de generación, la ubicación geográfica y la calidad del suministro, entre otros. Esto brinda a los consumidores la posibilidad de expresar sus preferencias y a los productores la capacidad de diferenciar sus productos para establecer un precio justo de comercialización. Sorin et al. [19], presenta un ejemplo de diferenciación de producto basado en la distancia entre los agentes que se encuentran distribuidos en dos nodos, y el sistema MAS se resuelve mediante el protocolo de consenso + innovación.

Como aporte principal se formula el esquema basado en el trabajo previo de Sorin et al. [19] modificando el planteamiento

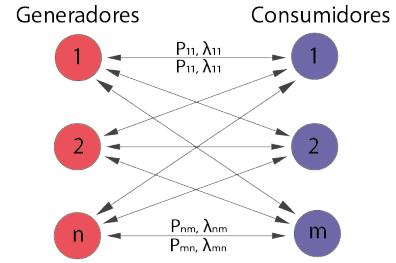


Figura 1: Esquema de mercado P2P.

miento de la función de costos para la demanda con base en lo propuesto en [15]. Adicionalmente, se aplica el algoritmo para el sistema de prueba de 14 nodos de la IEEE, en el cual se consideran diversas ubicaciones para los agentes y se evalúa su capacidad para alcanzar el óptimo global del sistema. Además, se examina la respuesta del algoritmo frente a variaciones en el criterio basado en la distancia de diferenciación de producto y en el aumento de la demanda. Con el objetivo de evaluar la viabilidad de utilizar el algoritmo de consenso + innovación en la resolución de un modelo de mercado P2P que incorpora un servicio auxiliar de regulación de frecuencia mediante la diferenciación de producto.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

II-A. Esquema de mercado

Se propone un enfoque basado en Sistemas Multiagentes con un esquema de mercado P2P, en el cual los consumidores y productores acuerdan un precio de comercialización de energía según sus preferencias. Para simular la interacción entre los participantes, se emplea el algoritmo de consenso + innovación. En la Figura 1 se ilustra el mercado propuesto, donde se establece un grafo de comunicación totalmente conectado. Esto significa que cada generador comparte información con cada carga y viceversa.

Dentro del contexto de este estudio, se considera un conjunto Ω_n con N agentes productores, un conjunto Ω_m con M agentes consumidores y Ω como la unión de ambos. Se define la potencia inyectada por el generador n (1) y la potencia consumida por la carga m (2), como la suma de la potencia tranzada con cada agente que compone su conjunto vecindario ω_n o ω_m , respectivamente.

$$P_n = \sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \quad (1)$$

$$P_m = \sum_{n \in \omega_m} P_{mn} \quad (2)$$

Se plantea la función de costo cuadrática para los agentes generadores,

$$C_n(P_n) = \frac{1}{2} a_n P_n^2 + b_n P_n + d_n \quad (3)$$

donde, a_n , b_n y d_n son coeficientes positivos. Por otra parte, se define la función de utilidad cuadrática de la demanda [15],

$$U_m(P_m) = -\frac{1}{2} \alpha_m P_m^2 + \beta_m P_m \quad (4)$$

En este caso, el término cuadrático representa la saturación de la satisfacción que tiene la demanda a medida de que consume más potencia. De igual forma, α_m y β_m son parámetros positivos. Transformando la ecuación (4) en la función de costo para la demanda se obtiene:

$$C_m(P_m) = \frac{1}{2}\alpha_m P_m^2 - \beta_m P_m \quad (5)$$

Los costos de comercialización del generador n y de la carga m se definen como:

$$\tilde{C}_n(\rho_n) = - \sum_{m \in \omega_n} \lambda_{nm} P_{nm} \quad (6)$$

$$\tilde{C}_m(\rho_m) = \sum_{n \in \omega_m} \lambda_{mn} P_{mn} \quad (7)$$

Aquí, λ_{nm} representa el precio de venta ofertado por el generador n a la carga m sobre la potencia P_{nm} . A su vez, λ_{mn} es el precio que la carga m está dispuesta a pagar por la potencia P_{mn} . Por otra parte, ρ_n y ρ_m son vectores compuestos de las variables de decisión P_{nm} y P_{mn} , respectivamente. El signo negativo en (6) refleja el beneficio obtenido por el agente generador por la venta de potencia.

Finalmente, se incluye el coeficiente de comercio bilateral C_{ij} , que agrupa los costos de diferenciación de producto. Este coeficiente se calcula de acuerdo con los criterios de evaluación del comercio diferenciado entre agentes en el conjunto G . La perspectiva del agente $i \in \Omega$ bajo el criterio $g \in G$ para el comercio con el agente $j \in \omega_i$, se modela mediante el parámetro γ_{ij}^g .

$$C_{ij} = \sum_{g \in G} c_i^g \gamma_{ij}^g \quad (8)$$

Donde c_i^g es el factor de influencia del criterio g sobre i . Los coeficientes de comercio bilateral pueden considerarse como factores de recompensa o penalidad en función de su signo. De (3)(6)(8) se obtiene la función de costos para el generador n

$$C_n(\rho_n) = \frac{1}{2}a_n P_n^2 + b_n P_n + d_n - \sum_{m \in \omega_n} \lambda_{nm} P_{nm} + \sum_{m \in \omega_n} C_{nm} P_{nm} \quad (9)$$

Y de (5), (7) y (8) para la demanda m

$$C_m(\rho_m) = \frac{1}{2}\alpha_m P_m^2 - \beta_m P_m + \sum_{n \in \omega_m} \lambda_{mn} P_{mn} + \sum_{n \in \omega_m} C_{mn} P_{mn} \quad (10)$$

II-B. Problema de optimización

El problema de optimización se formula con el propósito de asignar recursos de manera óptima, minimizando la función de costo agregada de todo el sistema (11). Esto se realiza considerando restricciones de límite tanto para la generación como para el consumo, según corresponda (12), así como un balance de potencia (13) y condición de no negatividad (14)

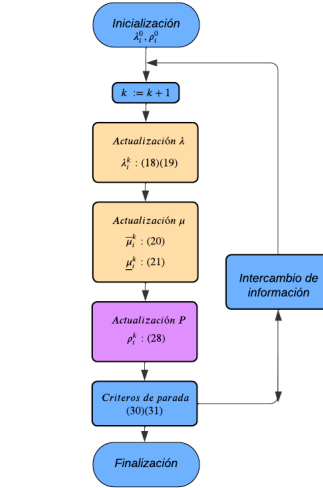


Figura 2: Diagrama de flujo del algoritmo.

$$\min \sum_{i \in \Omega} C_i(\rho_i) \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \quad \forall i \in \Omega \quad (12)$$

$$P_{nm} = P_{mn} \quad \forall (n, m) \in (\Omega_n, \Omega_m) \quad (13)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in (\Omega, \omega_i) \quad (14)$$

Para aplicar el método de consenso + innovación y abordar el problema de despacho óptimo de manera completamente distribuida, se descompone el problema global en problemas de optimización locales para cada agente. Así, se plantea el siguiente problema de optimización local:

$$\min C_i(\rho_i) \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \underline{P}_i \leq P_i \leq \overline{P}_i \quad (16)$$

$$P_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in \omega_i \quad (17)$$

II-C. Algoritmo de solución

Dentro del esquema propuesto, los agentes llegan a un acuerdo iterativo sobre un precio de comercialización bilateral para la energía, utilizando el algoritmo de consenso con un término adicional llamado "innovación". Este término tiene como objetivo cumplir con la restricción (13) de reciprocidad de potencia entre los agentes del problema de optimización global, buscando así un equilibrio entre generación y demanda.

El algoritmo se divide en tres etapas principales: actualización de las variables duales, actualización de las variables primales y evaluación de los criterios de convergencia. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo correspondiente para cada agente i .

II-C1. Actualización de variables duales: Una vez inicializadas λ_i y ρ_i para $i \in \Omega$ en la iteración $k = 0$, donde λ_i es el vector compuesto de los precios de comercio $\lambda_{ij} \forall j \in \omega_i$,

los agentes actualizan su vector local de precios λ_i aplicando la ecuación de consenso + innovación

$$\lambda_{nm}^k = \lambda_{nm}^{k-1} - \beta^k (\lambda_{nm}^{k-1} - \lambda_{mn}^{k-1}) - \alpha^k (P_{nm}^{k-1} - P_{mn}^{k-1}) \quad \forall (n, m) \in (\Omega_n, \omega_n) \quad (18)$$

$$\lambda_{mn}^k = \lambda_{mn}^{k-1} - \beta^k (\lambda_{mn}^{k-1} - \lambda_{nm}^{k-1}) + \alpha^k (P_{mn}^{k-1} - P_{nm}^{k-1}) \quad \forall (m, n) \in (\Omega_m, \omega_m) \quad (19)$$

Donde β^k y α^k son secuencias decrecientes de valores positivos que representan el peso del factor de consenso y el factor de innovación, respectivamente, en la iteración k . De tal forma que λ_{ij}^k diverge si no existe reciprocidad de precio y potencia entre agentes. Luego se actualizan las variables duales de holgura correspondientes a las restricciones de límite de potencia generada o consumida (16) según corresponda,

$$\bar{\mu}_i^k = \max(0, \bar{\mu}_i^{k-1} + \eta^k (P_i^{k-1} - \bar{P}_i)) \quad (20)$$

$$\underline{\mu}_i^k = \max(0, \underline{\mu}_i^{k-1} + \eta^k (\underline{P}_i - P_i^{k-1})) \quad (21)$$

Donde η^k es una secuencia de números positivos.

II-C2. Actualización de variables primales: Para la actualización del vector ρ_i se plantea el Lagrangiano de generadores y demanda a partir de (15), (9) y (10)

$$L_n(\rho_n, \lambda, \underline{\mu}_n, \bar{\mu}_n) = \frac{1}{2} a_n P_n^2 + b_n P_n + d_n - \sum_{m \in \omega_n} \lambda_{nm} P_{nm} + \sum_{m \in \omega_n} C_{nm} P_{nm} + \bar{\mu}_n (P_n - \bar{P}_n) - \underline{\mu}_n (P_n - \underline{P}_n) \quad (22)$$

$$L_m(\rho_m, \lambda, \underline{\mu}_m, \bar{\mu}_m) = \frac{1}{2} \alpha_m P_m^2 - \beta_m P_m + \sum_{n \in \omega_m} \lambda_{mn} P_{mn} + \sum_{n \in \omega_m} C_{mn} P_{mn} + \bar{\mu}_m (P_m - \bar{P}_m) - \underline{\mu}_m (P_m - \underline{P}_m) \quad (23)$$

Considerando el Lagrangiano para generadores (22) y demanda (23), se plantean las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker para cada uno,

$$a_n P_n + b_n + C_{nm} - \lambda_{nm} + \bar{\mu}_n - \underline{\mu}_n = 0 \quad (24)$$

$$\alpha_m P_m - \beta_m + C_{mn} + \lambda_{mn} + \bar{\mu}_m - \underline{\mu}_m = 0 \quad (25)$$

A continuación, para cada negociación se obtiene la referencia de potencia del generador n con la carga m para las condiciones de precio y variables de holgura de la iteración k ,

$$P_n^{(m)k} = \frac{\lambda_{nm} - C_{nm} - \bar{\mu}_n + \underline{\mu}_n - b_n}{a_n} \quad (26)$$

La expresión equivalente para la demanda m queda,

$$P_m^{(n)k} = \frac{-\lambda_{mn} - C_{mn} - \bar{\mu}_m + \underline{\mu}_m + \beta_m}{\alpha_n} \quad (27)$$

Finalmente, se define la expresión para la actualización de variables primales,

$$P_{ij}^k = \max(0, P_{ij}^{k-1} + f_{ij}^k (P_i^{(j)k} - P_i^{k-1})) \quad (28)$$

Donde $P_i^{(j)k}$ es calculado a partir de (26) o (27) según corresponda y f_{ij}^k es un factor proporcional calculado como

$$f_{ij}^k = \frac{|P_{ij}| + \delta^k}{\sum_{l \in \omega_i} (|P_{il}| + \delta^k)} \quad (29)$$

II-C3. Evaluación criterios de convergencia: Como paso final, se evalúa si el cambio de las variables P_{ij} y λ_{ij} entre la iteración k y $k-1$, es menor a los umbrales establecidos en ϵ_P y ϵ_λ , para determinar si se alcanza la convergencia del algoritmo o se debe continuar realizando el proceso iterativo; para lo cual cada agente deberá compartir la información de precio y potencia a tranzar con su vecindario ω_i

$$|P_{ij}^k - P_{ij}^{k-1}| \leq \epsilon_P \quad (30)$$

$$|\lambda_{ij}^k - \lambda_{ij}^{k-1}| \leq \epsilon_\lambda \quad (31)$$

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Utilizando el lenguaje de programación Python para la simulación de la metodología propuesta, se evalúan diferentes aspectos del algoritmo sobre la factibilidad en la aplicación del despacho económico de un sistema de distribución, con alta penetración de energías renovables, bajas confiabilidad e inercia, y considerando servicios complementarios para soporte ante eventos de sobrefrecuencia. Inicialmente, se comparan los resultados del despacho óptimo con base en el esquema de mercado P2P, con la optimización realizada por la librería pandapower [20] para el sistema de la IEEE de 14 nodos, cuyos parámetros se presentan en la Tabla I. Aquí se modela una demanda invariante que no modifica su consumo ante las variaciones de precio. Debido a la gran cantidad de variables de decisión que posee el sistema, se optó por no hacer uso de operaciones matriciales que son típicas en algoritmos basados en consenso, pues son altamente demandantes a nivel de recursos de computo. En su lugar, se realizó la programación del esquema usando ciclos, donde se actualiza de forma secuencial las variables locales de los agentes para cada iteración.

La comparación de los despachos obtenidos para cada agente generador n se presentan en la Tabla II. Se identifica que el error relativo entre los dos resultados es menor al 0.1 %. Por otra parte, las interacciones de precio y energía comercializada entre la demanda $m1$ con los agentes generadores $n \in \omega_{m1}$ se observan en la Figura 3. Se observa el mismo comportamiento para todas las interacciones del sistema, donde los agentes llegan a un acuerdo sobre precio y energía comercializada.

Se evalúa el desempeño del algoritmo ante cambios en la demanda y la diferenciación de producto, como en [19] será la distancia entre los diferentes agentes de la siguiente forma

$$C_{ij} = c_i^1 \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad \forall (i, j) \in (\Omega, \omega_i) \quad (32)$$

Se realizó una simulación compuesta de tres etapas: primero se solucionó el mismo sistema considerado en la simulación de comparación, esto es con el valor de influencia del criterio de distancia c_i para todos los agentes igual a cero, posteriormente

Tabla I: Parámetros de agentes

Generadores							
n	nodo	P_n	$\bar{P}_n$	a_n	b_n	x_n	y_n
0	1	0.0	332.4	0.09	1	1.967395	-0.961020
1	2	0.0	140.0	0.08	2	2.977985	-1.041288
2	3	0.0	100.0	0.06	3	3.780661	-1.606686
3	6	0.0	100.0	0.07	4	2.532118	1.205616
4	8	0.0	100.0	0.06	4	5.904275	-0.540215
Demandas							
m	nodo	P_m	$\bar{P}_m$	α_m	β_m	x_m	y_m
0	2	21.7	21.7	0.052	9	2.977985	-1.041288
1	3	94.2	94.2	0.052	9	3.780661	-1.606686
2	4	47.8	47.8	0.052	9	3.833734	-0.491466
3	5	7.6	7.6	0.052	9	2.693707	-0.095883
4	6	11.2	11.2	0.052	9	2.532118	1.205616
5	9	29.5	29.5	0.052	9	4.274949	0.533538
6	10	9.0	9.0	0.052	9	3.272307	0.961985
7	11	3.5	3.5	0.052	9	1.836684	1.089007
8	12	6.1	6.1	0.052	9	2.337117	2.309163
9	13	13.5	13.5	0.052	9	3.309492	2.117980
10	14	14.9	14.9	0.052	9	4.396205	1.684758

Tabla II: Comparación despacho óptimo

P_n	P2P	PandaPower	Error
0	62.099	62.035	0.0896 %
1	57.308	57.290	0.0325 %
2	59.729	59.720	0.0155 %
3	36.866	36.902	-0.0998 %
4	43.065	43.053	0.0277 %

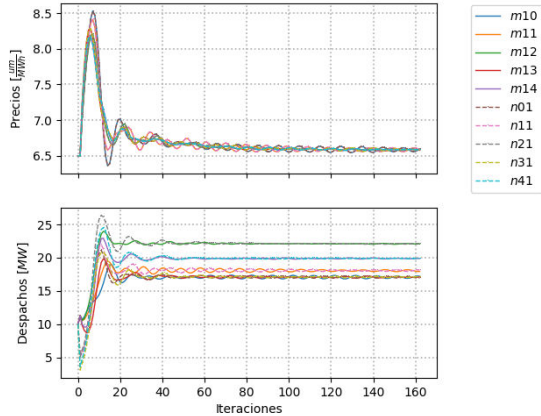


Figura 3: Interacción de la demanda m_1 con su vecindario Ω_{m_1} agentes bajo esquema de mercado P2P. En la gráfica superior um indica unidades monetarias.

se modificó c_i a $0,2 \frac{um}{km}$ y finalmente se simuló un incremento de carga del 10 % en todo el sistema. Para la primera etapa se cumplieron los criterios de convergencia a las 161 iteraciones, en la segunda fueron 97 y en la última se requirieron 35. En la Figura 4, se presenta el comportamiento de la carga m_1 ante los eventos. Se observa que en la segunda etapa, debido a la inclusión del criterio de diferenciación, la energía comercializada con el agente productor n_2 incrementa de manera significativa, debido a que se encuentran conectados al mismo nodo, por su parte la comercializada con los demás agentes disminuye. Para la tercera etapa, se observa que se satisface

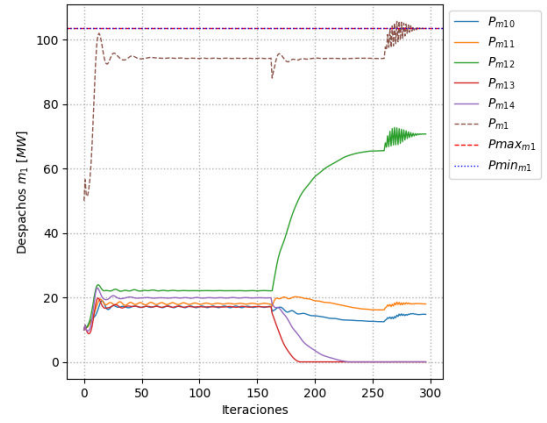


Figura 4: Respuesta de la demanda m_1 a los cambios en el sistema.

el incremento del 10 % sobre la potencia demandada inicial. Para todas las simulaciones los parámetros de sintonización del algoritmo y criterios de convergencia fueron

$$\beta^k = \frac{0,5}{k^{0,1}}; \quad \alpha^k = \frac{0,1}{k^{0,1}}; \quad \eta^k = 0,01; \quad \delta^k = 1$$

$$\epsilon_\lambda = 0,1; \quad \epsilon_P = 0,01$$

Finalmente, considerando que en una implementación real del esquema, los agentes realizarán las actualizaciones de sus variables de decisión de forma paralela y no secuencial, se estima que la duración de la iteración k se aproxima al tiempo promedio tomado por cada ciclo de actualización de agentes, el cual fue de $59,38 \mu s$. Al multiplicar este valor por la cantidad total de iteraciones requeridas en la segunda simulación (293), se obtiene un tiempo de convergencia de $17,4 ms$.

IV. CONCLUSIÓN

Se aplicó el despacho económico distribuido propuesto en [19] con base en un mercado P2P con diferenciación de producto en el sistema IEEE de 14 nodos, el cual es resuelto aprovechando la comunicación entre los agentes generadores y consumidores involucrados, empleando una combinación de teoría de consenso e innovación. Este enfoque posibilita alcanzar un acuerdo en relación al costo y la cantidad de energía negociada de manera bilateral. Se llevaron a cabo simulaciones que permitieron demostrar la eficacia del método para alcanzar el óptimo global y evaluar su rendimiento ante cambios en la configuración del sistema. Los resultados indican una respuesta estable y rápida bajo las condiciones consideradas, lo que lo convierte en una opción viable para abordar la provisión de un servicio complementario de respuesta a eventos de sobrefrecuencia, a través de la diferenciación de producto. Este hallazgo resulta especialmente relevante para la implementación de soluciones con base en microrredes en sistemas de distribución no interconectados con baja confiabilidad, como el de Puerto Carreño, donde el generador síncrono principal posee una respuesta lenta de regulación de frecuencia ante cambios abruptos en la demanda, producto de disparo de circuitos alimentadores.

V. AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido financiado por Minciencias a través del contrato 80740-542-2020 del Programa de Investigación en Tecnologías Emergentes para Microrredes Eléctricas Inteligentes con Alta Penetración de Energías Renovables

REFERENCIAS

- [1] S. Kar and G. Hug, "Distributed robust economic dispatch in power systems: A consensus + innovations approach," in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8, 2012.
- [2] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 6 2015.
- [3] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, and C. Chen, "Networked microgrids for self-healing power systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 310–319, 1 2016.
- [4] J. A. Villanueva-Rosario, F. Santos-García, M. E. Aybar-Mejía, P. Mendoza-Araya, and A. Molina-García, "Coordinated ancillary services, market participation and communication of multi-microgrids: A review," *Applied Energy*, vol. 308, p. 118332, 2 2022.
- [5] H. Afrakhte and P. Bayat, "A contingency based energy management strategy for multi-microgrids considering battery energy storage systems and electric vehicles," *Journal of Energy Storage*, vol. 27, 2020.
- [6] N. Hatzigiargyriou, *Microgrids: Architectures and Control*. John Wiley and Sons Ltd, 1 ed., 2014.
- [7] H. Zou, S. Mao, Y. Wang, F. Zhang, X. Chen, and L. Cheng, "A survey of energy management in interconnected multi-microgrids," 2019.
- [8] N. Salehi, H. Martinez-Garcia, G. Velasco-Quesada, and J. M. Guerrero, "A comprehensive review of control strategies and optimization methods for individual and community microgrids," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15935–15955, 2022.
- [9] M. Spiegel, E. Veith, and T. Strasser, "The spectrum of proactive, resilient multi-microgrid scheduling: A systematic literature review," *Energies*, vol. 13, 2020.
- [10] F. Khavari, A. Badri, A. Zangeneh, and M. Shafiekhani, "A comparison of centralized and decentralized energy-management models of multi-microgrid systems," 2017.
- [11] N. Quijano, C. Ocampo-Martinez, J. Barreiro-Gomez, G. Obando, A. Pantoja, and E. Mojica-Nava, "The role of population games and evolutionary dynamics in distributed control systems: The advantages of evolutionary game theory," *IEEE Control Systems*, vol. 37, pp. 70–97, 2 2017.
- [12] E. Baron-Prada and E. Mojica-Nava, "A population games transactive control for distributed energy resources," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 130, 9 2021.
- [13] E. M. Nava, *Optimización y control en grafos*, vol. 1. 2022.
- [14] E. Mojica-Nava, F. Ruiz, and E. Baron-Prada, "Fully distributed transactive control considering pricing dynamics and network constraints," *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1–1, 6 2022.
- [15] N. Rahbari-Asr, U. Ojha, Z. Zhang, and M. Y. Chow, "Incremental welfare consensus algorithm for cooperative distributed generation/demand response in smart grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, pp. 2836–2845, 11 2014.
- [16] S. Kar, J. M. F. Moura, and K. Ramanan, "Distributed parameter estimation in sensor networks: Nonlinear observation models and imperfect communication," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 6, pp. 3575–3605, 2012.
- [17] G. Hug, S. Kar, and C. Wu, "Consensus + innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1893–1903, 7 2015.
- [18] M. I. Azim, W. Tushar, T. K. Saha, C. Yuen, and D. Smith, "Peer-to-peer kilowatt and negawatt trading: A review of challenges and recent advances in distribution networks," 11 2022.
- [19] E. Sorin, L. Bobo, and P. Pinson, "Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, pp. 994–1004, 3 2019.
- [20] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, and M. Braun, "pandapower — an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, pp. 6510–6521, Nov 2018.

An iterative method for the multi-source interval uncertainty Inventory Routing Problem

Carlos Franco and Juan Carlos Figueroa-García

Abstract—This paper presents the use of an iterative algorithm for the multi-source interval uncertainty Inventory Routing Problem. The mathematical formulation with the uncertain parameters is presented with the explanation of the method used. Then we show the results over an instance which presents the convergence of the different elements proving the usability of the method.

Index Terms—Optimization, Uncertainty, Inventory Routing Problem, Interval parameters

I. INTRODUCTION

THE design, configuration and operationalization of a distribution network is related with tactical and operative decisions that are interrelated. In this sense decisions related to inventory control and vehicle routing problem composed the well-known Inventory Routing Problem which has been studied deeper in the scientific literature for its applicability in industrial operations. The complexity of this combined problems is determined by the multi periodicity and the variability of customers' demand which makes hard to solve the problem because it is not as simple as finding a common policy to distribute products, it requires a computational effort to find the optimal policy. Usually, enterprises deals with this problems adopting the inventory management system policy which to centralize the replenishment and distribution plans [1]. The implementation of this type of policy supports the reduction of the overall logistic costs [2].

In real life conditions, variability is one of the most important features when planning a logistic operation, mostly in real life situations, the parameters cannot be determined exactly because of the complexity of the different elements such as stakeholders, product types, marketing, and so on [2], [3]. In this work we propose an iterative algorithm for solving the Inventory Routing Problem considering a single product, multiple periods of time and uncertainty in multiple parameters.

II. MATHEMATICAL MODEL

We have proposed the mathematical formulation of the Inventory Routing Problem using the classic approaches presented in [4]-[6] where some parameters are uncertain. The problem consists in a set of nodes N that contains the depot and the set of customers C . The depot must deliver a single product to the customers over a planning horizon T considering the amount of product available $r1$ and the demand of customers rs_c which also have a maximum and minimum inventory levels U_c and L_c respectively that must be satisfied and kept by the variable Is_{ct1} .

The single vehicle deliver product restricted to its capacity Cap and its distribution process is modeled with variable x_{nt} that is also related with the activation of arcs in the route described by variable y_{nnt} . The following is the information of the mathematical model used:

Sets:

C Set of customers

N Set of nodes

T Set of time periods

$T1$ Set of time periods including $T + 1$

Parameters:

Cap Capacity of each vehicle

$r1$ Amount of product available at the depot for each period time

$B1$ Initial inventory level at the depot

$h1$ Inventory holding cost at the depot

L_c Security stock for each customer

II_c Initial inventory level for each customer

rs_c Amount of product consumed by each customer for each period time

Interval parameters:

$\tilde{U}_c$ Maximum inventory level at each customer

$\tilde{c}_{nn}$ Transportation cost between each pair of nodes

$\tilde{h}_{sc}$ Inventory holding cost for each customer

Decision Variables:

$z_{nt} \begin{cases} 1 & \text{a vehicle visit a specific node in an specific time period} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

x_{nt} Amount of product delivered to each customer in an specific time period

Is_{ct1} Inventory levels at each customer for each period time

B_{t1} Inventory levels at supplier for each period time

$y_{nnt} \begin{cases} 1 & \text{if the arc is traversed in an specific period time} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

The mathematical model is as follows:

$$\min \sum_{t \in T1} h1 \cdot B_t + \sum_{s \in C} \sum_{t \in T1} \tilde{h}_s \cdot Is_{st} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{t \in T1} \tilde{c}_{ij} \cdot y_{ijt} \quad \text{s.t} \quad (1)$$

$$B_1 = B \quad (2)$$

$$B_t = B_{t-1} + r1 - \sum_{s \in C} x_{st-1}, \forall t \in T1 \quad (3)$$

$$B_t \geq \sum_{s \in C} x_{st}, \forall t \in T \quad (4)$$

$$Is_{s1} = Ii_s, \forall s \in C \quad (5)$$

$$Is_{st} = Ii_{st-1} + x_{st-1} - rs_s, \forall s \in C, \forall t \in T1 \quad (6)$$

$$Is_{st} \leq L_s, \forall s \in C, \forall t \in T1 \quad (7)$$

$$x_{st} \geq U_{st} \cdot z_{st} - Is_{st}, \forall s \in C, \forall t \in T \quad (8)$$

$$x_{st} \leq U_{st} - Is_{st}, \forall s \in C, \forall t \in T \quad (9)$$

$$x_{st} \geq \tilde{U}_{st} - Is_{st}, \forall s \in C, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{s \in C} x_{st} \leq Cap, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{s \in C} x_{st} \leq Cap, \forall t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ijt} + \sum_{j \in N} y_{jit} = 2 \cdot z_{it}, \forall i \in N, t \in T \quad (13)$$

$$z_{nt} \in \{0, 1\}, \forall n \in N, t \in T \quad (14)$$

$$x_{nt} \in \mathbb{Z}, \forall n \in N, t \in T \quad (15)$$

The objective function (1) aims to minimize the overall costs composed by the inventory holding costs and the routing costs. Equations (2) and (3) describe the inventory levels at the depot while equation (4) guarantee that the amount of product delivered doesn't exceed the product available at inventory.

Constraints (5) and (6) represents the inventory levels at each customer where (7) determine the upper level of inventory while equations (8), (9) and (10) defines the lower inventory levels.

Equations (11) and (12) guarantees the vehicle capacity and (13) are the routing constraints. Finally, the type of variables is defined in equation (14) and (15).

III. PROPOSED ALGORITHM AND RESULTS

To consider multiple sources of uncertainty we have adapted the method proposed and tested in [7], [8] which consist in an iterative method that finds the convergence of a solution balancing the different elements with uncertainty and modeled trough intervals. The method consists in the following steps:

Given an optimization model composed by the coefficient cost c_j , the right-hand side values b and the technological coefficients a_{ij} , the main idea of the method is to compute the value of α by using the minimum and maximum values of each one of the parameters according to equations (16) and (17).

$$|\alpha = \frac{c_j^\alpha - \underline{c}_j}{\bar{c}_j - \underline{c}_j} \rightarrow c_j^\alpha = \underline{c}_j + \lambda \cdot (\bar{c}_j - \underline{c}_j) \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{\bar{a}_{ij} - a_{ij}^\alpha}{\bar{a}_{ij} - \underline{a}_{ij}} \rightarrow a_{ij}^\alpha = \bar{a}_{ij} - \lambda \cdot (\bar{a}_{ij} - \underline{a}_{ij}) \quad (17)$$

According to (16) and (17) the following steps must be followed:

- Choose a value for α and calculate the costs c_j
- Calculate the objective function using the minimum value of the right-hand side parameter b
- Calculate the objective function using the maximum value of the right-hand side parameter b
- Solve the min max problem using the results of the previous steps obtaining the objective value of λ

IV. A. RESULTS

We have adapted the instances proposed in [4], [6], [9], [10] to analyze the convergence of the proposed algorithm. Thus, we have modified the parameters mentioned in section II which are modeled with intervals. To check the convergence and the usability of the algorithm, we have tested an instance composed by 3 periods of time and 6 customers and the information related to the central depot. The range of the parameters with uncertainty varies with $\pm 20\%$. The results over the instance are presented in Table I. Results on the table are organized showing the number of the iteration, the objective function with the lower value of the parameters, the objective function with the upper value of the parameters and the value of lambda (λ).

TABLE I
SUMMARY OF RESULTS

Iteration	zl	zu	Lambda
1	639.441600	1546.31360	0.55904796
2	660.629114	1584.53137	0.56244481
3	659.292713	1581.42374	0.56239077
4	659.313973	1581.47391	0.56239194
5	659.313513	1581.47283	0.56239191
6	659.313523	1581.47285	0.56239192
7	659.313523	1581.47285	0.56239192
8	659.313523	1581.47285	0.56239192
9	659.313523	1581.47285	0.56239192

Results shows the convergence of the different values used in the mathematical model and the algorithm. We have used an initial value of $\lambda = 0.6$ and the convergence is reached in the sixth iteration where the objective values also reached to the same values.

V. CONCLUSIONS

We have proposed the use of an iterative algorithm for solving the multi-source interval Inventory Routing Problem through by computing several optimization problems finding the value of convergence λ . This allows us to determine the ranges of the objective function given the variability of the parameters.

REFERENCES

- [1] C. Franco-Franco and J. C. Figueroa-García, "A column generationbased algorithm for solving combined inventory and routing problems," *Ingeniare*, vol. 24, no. 2, 2016, doi: 10.4067/S071833052016000200012.

- [2] E. J. Alarcon Ortega and K. F. Doerner, "A sampling-based matheuristic for the continuous-time stochastic inventory routing problem with time-windows," *Comput. Oper. Res.*, vol. 152, p. 106129, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.COR.2022.106129.
- [3] A. Gutierrez-Alcoba, R. Rossi, B. Martin-Barragan, and T. Embley, "The stochastic inventory routing problem on electric roads," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 310, no. 1, pp. 156-167, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.EJOR.2023.02.024.
- [4] L. C. Coelho and G. Laporte, "The exact solution of several classes of inventory-routing problems," *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 558-565, 2013, doi: 10.1016/j.cor.2012.08.012.
- [5] C. Archetti, L. Bertazzi, G. Laporte, and M. G. Speranza, "A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed InventoryRouting Problem," *Transp. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 382-391, Aug. 2007, doi: 10.1287/trsc.1060.0188.
- [6] L. C. Coelho and G. Laporte, "Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products," *Comput. Oper. Res.*, vol. 47, pp. 42-52, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.cor.2014.01.013.
- [7] J. C. Figueroa García and C. Franco, "An Approach for Solving Fully Interval Production Planning Problems," pp. 267-276, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-81561-5_22.
- [8] J. C. Figueroa-García, C. Franco, and R. Neruda, "An Optimization Model for Location-Allocation of Health Services Under Uncertainty," *Stud. Comput. Intell.*, vol. 1036, pp. 97-108, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-97344-5_7/COVER.
- [9] L. C. Coelho and G. Laporte, "The exact solution of several classes of inventory-routing problems," *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 558-565, 2013, doi: 10.1016/j.cor.2012.08.012.
- [10] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, "Consistency in multivehicle inventory-routing," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 24, pp. 270-287, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.trc.2012.03.007.

Python Implementation of Type-2 Fuzzy Set Solving Job-Shop Scheduling Problems

Juan Carlos Figueroa Garcia , Joao Sebastian Tenjo García 
jcfigueroa@udistrital.edu.co, jtenjo@unal.edu.co

Resumen—This paper presents a novel Python implementation of a type-2 fuzzy linear programming model applied to job shop scheduling with uncertain processing times and delivery constraints. The proposed approach leverages type-2 fuzzy sets to represent uncertain processing times of jobs in a production system and product delivery constraints. The model is formulated as an extension of the crisp programming problem, using linear programming techniques. In this study, we present the theory and definitions underlying the application of the type 2 fuzzy linear programming model. The Best-Worst Cases (BWC) method is employed for the solution, which contributes to the robustness of the proposed approach. By developing the implementation in Python, we eliminate the dependence on expensive licensed optimization programs, often associated with steep learning curves. Instead, the Python model provides an affordable and efficient alternative for practitioners. The implementation leverages the power of the Scikit-fuzzy, matplotlib, Pyomo and Pandas libraries. Our contributions include the development of a comprehensive Python-based solution that not only improves scheduling accuracy, but also eliminates the need for proprietary software. In addition, the model accounts for complex uncertainties in both processing times and delivery constraints, which contributes to a more realistic and flexible scheduling framework. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through experimental tests.

Index Terms - Fuzzy linear programming (FLP), Interval linear programming (ILP) Interval type-2 fuzzy number (IT2FN), Fuzzy scheduling, Best-worst cases (BWC), scikit-fuzzy library,

I. INTRODUCTION

AFTER the introduction of type- 1 fuzzy sets in 1965 and type-2 fuzzy sets in 1975 by Zadeh [1], [2], a distinct variant known as type-2 interval fuzzy sets [3]-[6] emerged. Unlike type-2 fuzzy sets, type-2 interval fuzzy sets offer a higher degree of complexity, which makes computational operations more challenging. However, they provide a greater wealth of information and encompass a higher degree of uncertainties compared to type-1 fuzzy sets. Consequently, type-2 interval fuzzy sets take preference over other types of fuzzy sets when modeling optimization problems.

In recent years, the application of type-2 interval fuzzy sets in modeling FLP problems has received substantial attention [4]-[8]. For example, Figueroa [9] extended Zimmermann's method [10] to address interval type-2 FLP problems where the righthand side values are expressed through membership functions (MFs). In addition, Figueroa proposed several methodologies to model and solve interval-2 type FLP problems characterized by vagueness-based ambiguity by taking advantage of MFs to encapsulate uncertainties [3]-[6].

These approaches employ MFs to represent uncertainty related to the satisfaction levels of both the objective function and constraints.

Job scheduling is a prevalent task within production planning, involving the arrangement of jobs along predetermined routes on various machines (as exemplified in the work of Pinedo [11], Johnson & Montgomery [12], and Sipper & Bulfin [13]). In classical scheduling problems, both job processing times and deadlines remain constant, allowing the use of traditional optimization methods, unless the magnitude of the problem necessitates the adoption of metaheuristics or approximate algorithms.

However, in various scenarios, the stability of processing times and due dates cannot be guaranteed, necessitating a search for reliable sources. Often, statistical analysis provides a means to derive these values (as demonstrated by Heyman and Sobel [14]). However, there are cases where insufficient statistical data makes this approach difficult. In these cases, subject matter experts become invaluable sources of information, as their perceptions of processing times and delivery dates can be condensed into fuzzy sets.

II. BASICS ON FUZZY SETS

Type- 1 fuzzy sets with membership function $\mu_A(x)$ are denoted by capital letters A ; Type- 2 fuzzy sets (T2FS) with membership function $\mu_{\tilde{A}}(x)$ are denoted by emphasized capital letters $\tilde{A}$. $\mu_A(x)$ measures the affinity of a particular value $x \in X$ to the concept/word/label A , and $\mu_{\tilde{A}}(x)$ measures the degree of uncertainty of the same value $x \in X$ regarding A , so A measures imprecision and $\tilde{A}$ measures uncertainty. $\mathcal{P}(X)$ is the class of all crisp sets, $\mathcal{F}_1(X)$ is the class of all Type- 1 fuzzy sets, and $\mathcal{F}_2(X)$ is the class of all Type-2 fuzzy sets (see Mendel [7], [8]). Let $\mathcal{L}([0, 1])$ be the set of all closed subintervals over $[0, 1]$:

$$\mathcal{L}([0, 1]) = \{x = [x_l, x_r] \mid (x_l, x_r) \in [0, 1]^2, x_l \leq x_r\}.$$

Definition 1. A Type-2 fuzzy set is then the following ordered pair: $\tilde{A} = \{((x, u), \mu_{\tilde{A}}(x, u)) : x \in X, u \in J_x \subseteq [0, 1]\}$, in which $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$. $\tilde{A}$ can also be expressed as

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u)/(x, u), J_x \subseteq [0, 1]$$

where $\int$ denotes the union over all admissible x and u . where u is the secondary variable, J_x is the domain of uncertainty of u and $\tilde{A}$ measures uncertainty about the

linguistic label/word A . An IT2FS $\tilde{A}$ is a simpler form of a T2FS in which $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ encloses infinite Type-1 fuzzy sets into its Footprint of Uncertainty (FOU) (see Mendel, John and Liu [15]):

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\}$$

where $\mu_{\tilde{A}}(x)$ is defined by a upper membership function $\text{UMF}(\tilde{A}) = \bar{\mu}_{\tilde{A}} \equiv \bar{A}$ and a lower membership function $\text{LMF}(\tilde{A}) = \underline{\mu}_{\tilde{A}} \equiv \underline{A}$.

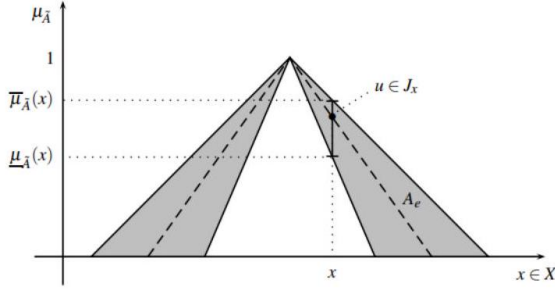


Figure 1. Displays an IT2FS $\tilde{A} \in \mathcal{F}_2(X)$ whose FOU is in gray and $A_e \in \mathcal{F}_1(X)$ denotes a type-1 fuzzy set embedded into the FOU of $\tilde{A}$.

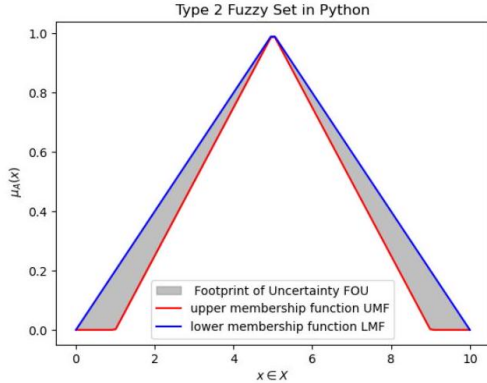


Figure 2. Displays an IT2FS $\tilde{A} \in \mathcal{F}_2(X)$ whose FOU is in gray but whose implementation is fully elaborated in Python using the Scikit-fuzzy and NumPy libraries.

Definition 2. A type-1 fuzzy set, A by the MF $\mu_A(x)$, defined on the set of the real numbers is called a type-1 fuzzy number when, $\sup_{x \in \mathbb{R}} \mu_A(x) = 1$, that is, the type-1 fuzzy set A is normal, $\mu_A\{\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2\} \geq \min\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)\}$, for all $\lambda \in [0, 1]$, that is, the set A is convex and $\mu_A(x)$ is a continuous function by intervals [16].

Definition 3. The α -cut of a type-1 fuzzy number A is a set defined as $A_\alpha = \{x \in \mathbb{R} \mid \mu_A(x) \geq \alpha\} = [\underline{A}(\alpha), \bar{A}(\alpha)]$, where $\underline{A}(\alpha) = \inf\{x \in \mathbb{R} \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$,

$$\bar{A}(\alpha) = \sup\{x \in \mathbb{R} \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

where $\inf$ and $\sup$ are the greatest lower bound and least upper bound, respectively.

Definition 4. The kernel of a type-1 fuzzy number, A is a set defined as $\ker(A) = \{x \in \mathbb{R} \mid \mu_A(x) = 1\}$.

In the general ILP problem, all the parameters (the objective function, technological coefficients, and the resource values) are closed intervals. Therefore, the ILP problem can be modeled as follows:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = \sum [c_j, \bar{c}_j] x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum [a_{ij}, \bar{a}_{ij}] x_j \leq [b_i, \bar{b}_i], \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (1)$$

where $c_j, \bar{c}_j, b_j, \bar{b}_j, a_{ij}$ and $\bar{a}_{ij}$ are real numbers.

Theorem 1. The objective function value of any arbitrary characteristic model of ILP model (1) belongs to the interval of the objective function values of the BWC method [17].

III. THE FLP PROBLEM WITH IT2FNS

In this section, we initially addressed an interval type-2 FLP problem involving ambiguity-based uncertainty.

The coefficients were exclusively interval type-2 triangular fuzzy numbers. Subsequently, we introduced and solved the intermediate model by substituting the kernel of interval type-2 triangular fuzzy numbers in the problem. Furthermore, we converted it into an FLP problem with characteristic interval-1 type-1 fuzzy numbers, and by means of the nearest interval approximation, we transformed it into an ILP problem. Finally, by exploiting the BWC method twice, we reach the optimal solution and value. Next, we provide a detailed step-by-step explanation of the proposed method:

Let us consider an interval type 2 triangular FLP problem characterized by uncertainties in both the right-hand sides of the constraints and the coefficients of the objective function, and the constraints as follows.

Consider the interval type-2 triangular FLP problem with uncertainties in right-hand sides of the constraints and the coefficients of both objective function and constraints as

$$\begin{aligned} \max \quad & \tilde{z} = \sum \tilde{c}_j x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \tilde{a}_{ij} x_j \leq \tilde{b}_j, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (2)$$

where $\tilde{c}_j, \tilde{b}_i$ and $\tilde{a}_{ij}$ are IT2FNS

The minimum and maximum values of the Kernel of the interval type 2 triangular fuzzy numbers in problem 2 are identical. As a result, a single intermediate model is solved as

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{z} = \sum \bar{c}_j x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \bar{a}_{ij} x_j \leq \bar{b}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (3)$$

By solving linear programming problem 3, we obtain $\bar{x}_{\text{opt}}$ and $\bar{z}_{\text{opt}}$. Since an interval type-2 triangular fuzzy number consists of an infinite union of characteristic type-1 triangular fuzzy numbers, the conventional embedded type-1 triangular fuzzy numbers are applied to all interval type-2 triangular fuzzy numbers in problem 2. This leads to the transformation of the problem into the subsequent characteristic type-1 triangular FLP problem. This leads to the transformation of the

problem into the subsequent characteristic type-1 triangular FLP type-1 problem.

$$\begin{aligned} \max \quad & z^e - \sum c_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum a_{ij}^e x_j \leq b_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

where $c_j^e \in \text{FOU}(\tilde{c}_j)$, $b_i^e \in \text{FOU}(\tilde{b}_i)$ and $a_{ij}^e \in \text{FOU}(\tilde{a}_{ij})$ are the embedded type-1 triangular fuzzy number.

Using the nearest interval approximation of the type-1 triangular fuzzy numbers of problem 4, it becomes equivalent to the following ILP problem,

$$\begin{aligned} \max \quad & z^e = \sum [\tilde{c}_j^e, \hat{c}_j^e] x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum [\tilde{a}_{ij}^e, \hat{a}_{ij}^e] x_j \leq [\tilde{b}_i^e, \hat{b}_i^e], \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

where,

$$\begin{aligned} \tilde{c}_j^e &\in [\tilde{c}_j^e, \bar{c}_j^e], \hat{c}_j^e \in [\hat{c}_j^e, \bar{c}_j^e], \tilde{a}_{ij}^e \in [\tilde{a}_{ij}^e, \bar{a}_{ij}^e], \hat{a}_{ij}^e \in [\hat{a}_{ij}^e, \bar{a}_{ij}^e] \\ \tilde{b}_i^e &\in [\tilde{b}_i^e, \bar{b}_i^e], \hat{b}_i^e \in [\hat{b}_i^e, \bar{b}_i^e] \end{aligned}$$

Also, with Theorem 1, the best and worst sub-models of the ILP problem 5 are obtained as follows:

$$\begin{aligned} \max \quad & \hat{z} = \sum \hat{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \hat{a}_{ij}^e x_j \leq \hat{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

and

$$\begin{aligned} \max \quad & \tilde{z} = \sum \tilde{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \tilde{a}_{ij}^e x_j \leq \tilde{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (7)$$

It is evident that problems 6 and 7 can be classified as ILP models. Consequently, their respective submodels are derived by applying Theorem 1 to them. The resulting models for problems 6 cover the best-best and best-worst scenarios: The best-best model.

1. The best-best model

$$\begin{aligned} \max \quad & \tilde{z} = \sum \tilde{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \tilde{a}_{ij}^e x_j \leq \tilde{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (8)$$

by solving linear programming problem 8, $\tilde{x}_{\text{opt}}$ and $\tilde{z}_{\text{opt}}$ are obtained.

2. The best-worst model

$$\begin{aligned} \max \quad & \hat{z} = \sum \hat{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \hat{a}_{ij}^e x_j \leq \hat{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (9)$$

By solving linear programming problem 9, we obtain $\hat{x}_{\text{opt}}$ and $\hat{z}_{\text{opt}}$. In addition, the models produced for problem 7 encompass the worst-best and worst-worst scenarios:

3. The worst-best model

$$\begin{aligned} \max \quad & \tilde{z} = \sum \tilde{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \tilde{a}_{ij}^e x_j \leq \tilde{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (10)$$

by solving linear programming problem 10, $\tilde{x}_{\text{opt}}$ and $\tilde{z}_{\text{opt}}$ are obtained.

4. The worst-worst model

$$\begin{aligned} \max \quad & \bar{z} = \sum \bar{c}_j^e x_j \\ \text{s.t.} \quad & \sum \bar{a}_{ij}^e x_j \leq \bar{b}_i^e, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

also, by solving linear programming problem 11, $\bar{x}_{\text{opt}}$ and $\bar{z}_{\text{opt}}$ are obtained. Therefore, the interval type-2 triangular fuzzy numbers

$\tilde{x}_{\text{jopt}} = ((\tilde{x}_{\text{jopt}}, \bar{x}_{\text{jopt}}, \tilde{x}_{\text{jopt}}), (\hat{x}_{\text{jopt}}, \bar{x}_{\text{jopt}}, \hat{x}_{\text{jopt}}))$ and $\tilde{z}_{\text{opt}} = ((\tilde{z}_{\text{opt}}, \bar{z}_{\text{opt}}, \tilde{z}_{\text{opt}}), (\hat{z}_{\text{opt}}, \bar{z}_{\text{opt}}, \hat{z}_{\text{opt}}))$ are optimal solution and optimal value for problem 2, respectively.

By solving linear programming problem 3, obtain $\bar{x}_{\text{jopt}}$ and $\bar{z}_{\text{opt}}$. Since an interval type-2 triangular fuzzy number consists of an infinite union of characteristic type-1 triangular fuzzy numbers, the conventional embedded type-1 triangular fuzzy numbers are applied to all interval type-2 triangular fuzzy numbers in problem 2. This leads to the transformation of the problem into the subsequent characteristic type-1 triangular FLP problem. This leads to the transformation of the problem into the subsequent characteristic type-1 triangular FLP type-1 problem. This leads to the transformation of the problem into the subsequent characteristic type-1 triangular FLP problem.

IV. THE CRISP SCHEDULING PROBLEM

The mathematical form of an n -jobs, m -machines scheduling problem (minimizing its makespan) is as follows.

$$z = \text{Min} \sum_j +d_j^+ - d_j^- + Ms,$$

s.t.

$$x_{gj} + t_{gj} \leq Ms \quad \forall j \in \mathbb{N}_n,$$

$$x_{rj} + t_{rj} \leq x_{sj} \quad \forall j \in \mathbb{N}_n,$$

$$x_{ip} + t_{ip} \leq x_{iq} + M \cdot y_k \quad \forall i \in \mathbb{N}_m, k \in \mathbb{N}_l,$$

$$x_{iq} + t_{iq} \leq x_{ip} + (1 - M)y_k \quad \forall i \in \mathbb{N}_m, k \in \mathbb{N}_l,$$

$$x_{gj} + t_{gj} + d_j^+ - d_j^- = d_j \quad \forall j \in \mathbb{N}_n.$$

Index sets:

$i \in \mathbb{N}_m$ is the set of m machines

$j \in \mathbb{N}_n$ is the set of n jobs

$k \in \mathbb{N}_l$ is the set of l conflicting jobs

Parameters:

$t_{ij} \in \mathbb{R}$ is the processing time of the j_{th} job in the i_{th} machine

$d_j \in \mathbb{R}$ is the due date of the j_{th} job

$M \in \mathbb{R}$ is a weight used to solve the conflict between two jobs $p, q \in \mathbb{N}_n$

Decision variables:

- $x_{ij} \in \mathbb{R}$ is the starting time of the j_{th} job in the i_{th} machine
- $Ms \in \mathbb{R}$ is the makespan of all jobs
- $y_k \in \mathbb{Z}$ is a binary variable to solve the k_{th} conflict between two jobs $p, q \in \mathbb{N}_n$
- $d_j^+ \in \mathbb{R}$ is the earliness of the j_{th} job
- $d_j^- \in \mathbb{R}$ is the tardiness of the j_{th} job

V. PYTHON IMPLEMENTATION

Problem setup: The algorithm starts by selecting a problem instance from the OR Library (e.g., <http://people.brunel.ac.uk/mastjjb/jeb/orlib/files/jobshop.1.txt>), which provides deterministic processing times, task sequences, and precedence constraints for a job shop scheduling problem.

1. Fuzzy set generation: The algorithm proceeds to generate interval type 2 triangular fuzzy fuzzy sets, which can represent the uncertainty inherent in processing times and task sequences. These fuzzy sets add a layer of realism to the scheduling problem, capturing the imprecision and ambiguity that often arise in real-world scenarios.
2. Random generation: The algorithm randomly generates type-2 triangular fuzzy sets for the processing time of each task. This randomness can simulate uncertain conditions without relying solely on fixed, deterministic values.
3. Expert input: Alternatively, the algorithm accommodates expert opinion. An expert can provide input in the form of fuzzy sets, allowing their experience to influence the scheduling process and reproduce real-world decision-making scenarios.
4. Python implementation: The algorithm employs Python scripts to perform the augmented scheduling problem with interval type 2 fuzzy triangular fuzzy sets. These scripts process the fuzzy data and generate the scheduling solution. These scripts process the fuzzy data and generate the scheduling solution.

5. Visualization: The algorithm includes visualization steps to enhance understanding of the process. An image or diagram can be included in the paper to illustrate the overall flow, highlighting the interaction between the deterministic problem instance, the fuzzy set generation and the Python implementation.
6. Best-Worst Cases (BWC): To optimize scheduling with uncertain data, the algorithm applies the best case method (BWC). This technique searches for the best and worst case scenarios for the scheduling problem, taking into account the range of possibilities introduced by the fuzzy sets.
7. Optimal solution: Running the BWC method yields the optimal value of interest, often referred to as the makespan. The makespan represents the time required to complete all tasks, providing a measure of the performance of the scheduling solution.

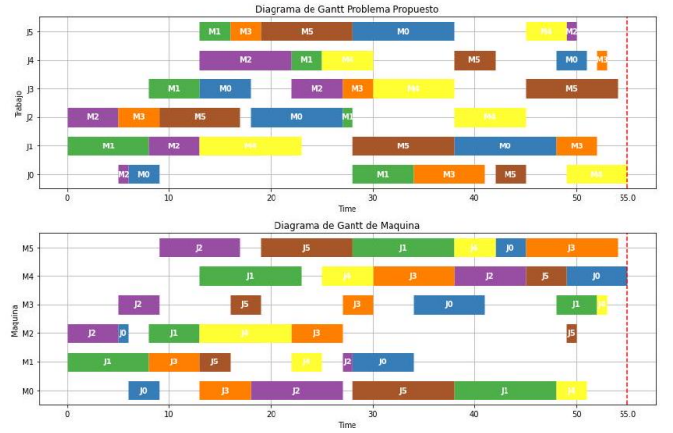


Figura 3. Gantt chart after applying BWC and obtaining the solution

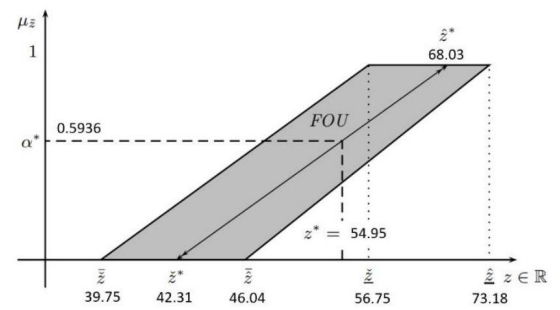


Figura 4. Interval Type-2 fuzzy set $\tilde{z}$ embedded into the FOU of $\tilde{Z}$.

```

1 # Data containing task durations and precedences
2 data = """
3
4 2 1 0 3 1 6 3 7 5 3 4 6
5 1 8 2 5 4 10 5 10 0 10 3 4
6 2 5 3 4 5 8 0 9 1 1 4 7
7 1 5 0 5 2 5 3 3 4 8 5 9
8 2 9 1 3 4 5 5 4 0 3 3 1
9 1 3 3 3 5 9 0 10 4 4 2 1
10 """
11
12 # Execute the proposed iterative method
13 TASKS = {}
14 for job, line in enumerate(data.splitlines()[1:]):
15     nums = line.split()
16     prec = None
17     for m, dur in zip(nums[:2], nums[1:2]):
18         task = (f"J{job}", f"M{m}")
19         TASKS[task] = {'dur': int(dur), 'prec': prec}
20     prec = task
21
22 # Display the resulting tasks
23 # pd.DataFrame(TASKS).T

```

Listing 1. Execution of python script that executes the tasks and designs a Gantt chart from the type-2 fuzzy sets and the type-2 fuzzy linear programming

VI. CONCLUSION

In conclusion, this paper presents a complete Python implementation of the proposed type-2 fuzzy linear programming model for shop scheduling with uncertain processing times and delivery constraints. By applying the method described in the theoretical framework, we have successfully addressed the challenges posed by uncertain parameters in the scheduling problem. This study demonstrates the effectiveness of using

interval type-2 fuzzy sets to model complex uncertainties and constraints in real-world scheduling scenarios.

Through the development of the Python-based solution, we have shown the practical application of the type-2 fuzzy approach, providing a user-friendly alternative to proprietary optimization software. This approach not only improves the accuracy of shop floor scheduling, but also avoids the barriers associated with licensing costs and steep learning curves.

VII. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to the Prof. Miguel Melgarejo and Prof. José Jairo Soriano Mendez sincerely for their interest and invaluable support, and a special gratefulness is given to all members of LAMIC.

REFERENCES

- [1] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965..
- [2] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975.
- [3] M. Javanmard and H. Mishmast Nehi, Rankings and operations for interval type-2 fuzzy numbers: a review and some new methods,"*Journal of Applied Mathematics and Computing*, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12190-018-1193-9>
- [4] Melgarejo, M.A.: A fast recursive method for computing the generalized centroid of a type-2 interval fuzzy set. In: Annual Meeting Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Information Processing Society (NAFIPS).Information Processing Society (NAFIPS). IEEE, pp. 190194 (2007).
- [5] J.M. Mendel, R.I. John y F.L. Liu, "Interval type-2 fuzzy logical systems made simple", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 14, n° 6, pp. 808-821, 2006.
- [6] C.A. Bustos-Tellez, J.S. Tenjo-García y J.C. Figueroa-García, "Solving Job-Shop Scheduling Problems with Fuzzy Processing Times and Fuzzy Due Dates", 17th International Conference, IPMU 2018, Cádiz, España, 11-15 de junio de 2018, *Proceedings, Part I*, vol. 17, pp. 790-799,
- [7] J. M. Mendel, "Advances in Type-2 fuzzy sets and systems," *Inf. Sci.*, vol. 177, pp. 84–110, 2007
- [8] J. M. Mendel and F. Liu, "Super-exponential convergence of the Karnik–Mendel algorithms for computing the centroid of an interval type2 fuzzy set," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 309–320, Apr. 2007.
- [9] J.C. Figueroa-García y G. Hernández, "A method for solving linear programming models with interval type-2 fuzzy constraints,"*Pesquisa Operacional*, vol. 34, pp. 73-89, 2014.
- [10] H.J. Zimmermann y R. Fuller, "Fuzzy reasoning for solving fuzzy mathematical programming problems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 60, pp. 121-133, 1993.
- [11] M.L. Pinedo, "Programación: Teoría, algoritmos y sistemas", 5.ª ed., Springer-Verlag, 2016.
- [12] L.A. Johnson y D.C. Montgomery, "Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control", John Wiley & Sons, 1974.
- [13] D. Sipper y R. Bulfin, "Producción: Planificación, control e integración", McGraw-Hill College, 1997.
- [14] D.P. Heyman y M.J. Sobel, "Stochastic Models in Operations Research, Vol. II: Stochastic Optimization", Dover Publishers, 2003.
- [15] J. M. Mendel, R. I. John, and F. Liu, "Interval type-2 fuzzy logic systems made simple," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 14, no. 6, pp. 808–821, Dec. 2006.
- [16] Javanmard, M., Mishmast Nehi, H.: Rankings and operations for interval type-2 fuzzy numbers: a review and some new methods. *J. Appl. Math. Comput.* (2018). <https://doi.org/10.1007/s12190-018-1193-9>...
- [17] S.C. Tong, "Interval number, fuzzy number linear programming", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 66, pp. 301-306, 1994.



Juan Carlos Figueroa-García (Senior Member, IEEE) received the B.S. and M.S. degrees in industrial engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2002 and 2009, respectively, and the Ph.D. degree in industrial engineering (meritorious mention) from National University of Colombia, Bogotá, Colombia, in 2014. Since 2006, he has been a full time Professor and a Researcher of the Faculty of Engineering of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in the areas of statistics and operations

research. He is co-editor of different Springer LNCS/CCIS volumes and IEEE conference proceedings, and author of several book chapters and multiple scientific papers. His main research interests include fuzzy measure, Type-2 fuzzy sets, fuzzy optimization, and fuzzy statistics. Figueroa-García received the International Fuzzy Systems Association Young Scientist Award in 2012, the North American Fuzzy Information Processing Society Best Interval Paper Award in NAFIPS-IFSA conference in 2013, the NAFIPS Outstanding Paper Award in 2010, the International Conference on Intelligent Computing Outstanding Leadership and Service Award in 2017, and the Young Talent competition for a position in the Faculty of Engineering of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia in 2006. He is a member of the Board of the North American Fuzzy Information Processing Society.



Jhoan Sebastian Tenjo García is a mathematician and obtained his degree from Universidad Nacional de Colombia in 2023. He also holds a degree in Industrial Engineering from Universidad Distrital Francisco José de Caldas, a degree he obtained in 2018. With a passion for mathematics and its practical applications, Jhoan has excelled as an accomplished researcher and author, contributing to numerous national and international articles in diverse fields such as optimization, linear programming, scheduling problems, vehicle routing

problems (VRP), fuzzy sets and fuzzy linear programming. Among his achievements is the honorable mention for student papers for the article "Solving capacitated vehicle routing problems with fuzzy delivery costs and fuzzy demands", awarded by the North American Fuzzy Information Processing Society. This recognition underscores his commitment to advancing the field of operations research and his dedication to producing impactful research. His area of expertise is data analytics, where he uses his knowledge of Python, SQL, R, Matlab and other tools to extract valuable information from complex data sets.

Development of robotic hand controlled by Arduino IoT cloud with esp32

1st Luana Stefany Moura dos Santos
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil
luana.stefany.moura07@aluno.ifce.edu.br

2nd Rafael Oliveira Campelo
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil
rafael.oliveira.campelo08@aluno.ifce.edu.br

3rd Gabriel Barbosa Pinheiro
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil
gabriel.barbosa.pinheiro62@aluno.ifce.edu.br

4th Rejane Cavalcante Sá Rodrigues
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil
rejane_sa@ifce.edu.br

5th Yuri Mateus Santiago
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil
yuri.mateus.santiago07@aluno.ifce.edu

Abstract—This article presents the application of the ESP32 microcontroller in operating a robotic hand, utilizing the Arduino IoT Cloud platform. The objective of this study is to demonstrate how the combination of these technologies, along with the Internet of Things (IoT), can enable efficient communication and control of a robotic device over the internet. Through this integration, the robotic hand can be remotely controlled, allowing for precise and real-time interactions. The study emphasizes the significance of IoT in robotics, highlighting how real-time connectivity and information exchange can drive significant advancements in automation and control of robotic devices. The results obtained demonstrate the effectiveness and feasibility of applying the ESP32 microcontroller and the Arduino Cloud platform in implementing IoT solutions for robotic devices.

Index Terms—Robotic Hand, ESP32, Arduino IoT cloud, IoT.

I. INTRODUCTION

THE Internet of Things (IoT) has been playing an increasingly vital role in various sectors, including industries and healthcare [5]. In this context, IoT has emerged as a promising technology [7], facilitating the connection and exchange of information between physical devices and computational systems. IoT has found extensive applications in different fields [6], and its integration with robotics has opened up new possibilities for automation and remote control of robotic devices.

In order to implement IoT in devices, the Arduino IoT Cloud platform offers advanced features for connecting, monitoring, and controlling devices in real-time [2] [4]. This platform simplifies the creation of IoT projects, allowing developers to focus on application logic without worrying about complex network infrastructure [1]. With its broad compatibility and support for a variety of sensors and actuators, the Arduino IoT Cloud has become a popular choice for implementing IoT solutions in diverse domains, including robotics.

Robotics based on IoT offers a range of significant benefits. By enabling the connection of the robotic hand to the internet, it becomes possible to control it remotely, facilitating its operation in inaccessible or hazardous environments for

humans [3]. This outcome highlights how the integration of the ESP32 microcontroller and the Arduino IoT Cloud platform demonstrates the effectiveness and feasibility of applying these technologies in implementing IoT solutions for robotic devices.

In [1], an IoT platform using the Arduino IoT Cloud was implemented in conjunction with a robotic arm, yielding favorable results for the application. Additionally, [2] demonstrated the use of the Arduino IoT Cloud for real-time sensor monitoring, allowing access to the dashboard from anywhere in the world through a mobile version.

The project aims to create an affordable solution, using widely available electronic components and the versatile ESP32 platform, known for its communication capabilities. At the project's conclusion, the objective is to achieve a functional robotic hand that is easy to control and can be integrated into various applications, such as assistive robotics, industrial automation, or scientific research.

This article is structured as follows: Section II describes the Research Methodology, including the materials, methods and procedures used. Section IV presents the results, and Section V provides the final considerations.

II. METHODOLOGY

In this project, a robotic hand controlled by the ESP32 microcontroller was used. The ESP32 is known for its Wi-Fi connectivity and advanced features. The Arduino Cloud platform was adopted as a means of communication between the robotic hand and a remote device, enabling interaction through the Internet.

A. Robotic Hand

The robotic hand was modeled in Fusion 360 software, as shown in Figure 1. This software was chosen for its capability of professional-level modeling, availability of student licenses, and its ability to generate the necessary files for 3D printing.

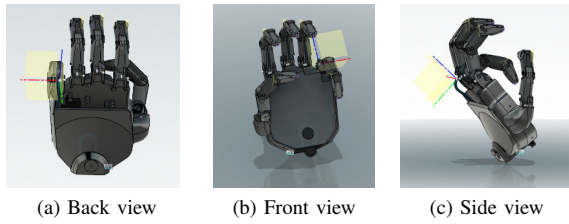


Fig. 1: Robotic Hand Modeling

The design was adapted to allow flexibility and movement of the fingers, using simple and efficient joints. The modeled parts were 3D printed using an Ender 3 3D printer, with PLA filament and a layer height of 0.16mm, as shown in Figure 2.

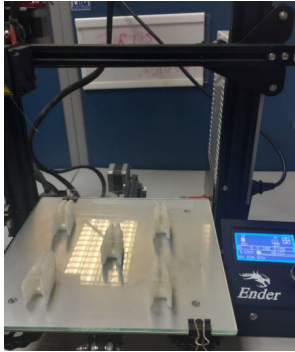


Fig. 2: Image of making parts on the Ender 3D printer.

The assembly of the robotic hand was done by connecting all the 3D printed parts. The SG90 servo motors, used to actuate the finger movements, were fitted inside the prototype. Figure 3 shows the fully assembled hand with the fingers and motors fitted into the structure.

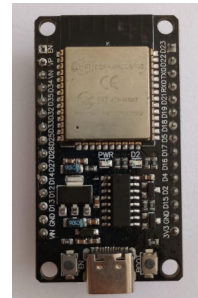


Fig. 3: Image of the beginning of the assembly of the hand pieces.

B. Esp 32

The ESP32 microcontroller was chosen due to its advanced features, particularly its Wi-Fi connectivity capabilities [1]. Studies and research were conducted to understand the architecture and capabilities of the ESP32, as well as its programming, which can be done using different programming languages such as C, C++, Python, and MicroPython.

Preliminary tests were carried out to ensure the compatibility and suitability of the ESP32 for the proposed application. The programming language applied in this article was C++.



(a) Esp32



(b) Servo Motor

Fig. 4: Embedded system and engine used in the prototype

The ESP32 is powered by a 5V power source and receives the control signals for the servo motors through 5 analog pins. The servo motors are also powered by an external 5V power source. Figure 5 illustrates the circuit diagram.

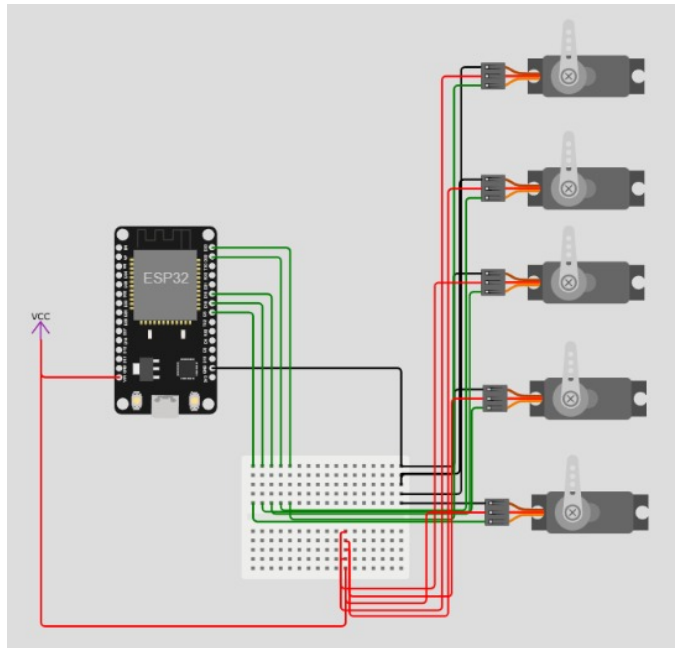


Fig. 5: Circuit diagram ESP and servo motors

C. Arduino IoT Cloud

The Arduino IoT Cloud is a user-friendly tool that facilitates the creation of projects, enabling effective interaction for users of all levels of knowledge, from beginners to advanced [2].

1) *Creating an Arduino Account:* The first step we need to create a account in official Arduino website. To this project, the basic plan offered by Arduino IoT Cloud was enough. In the Arduino Cloud website select the IoT Cloud option to be redirected to the platform

2) *Creating a Thing:* Here we create a new "Thing," which will serve as the central hub where you can access the device, the programming sketch, and variables, as seen in the figure 6.

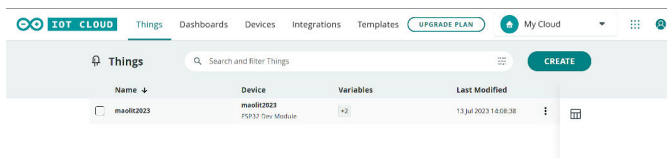


Fig. 6: Configuring the Thing

3) *Configuring a Device:* We begin the configuration by choosing the device, as shown in Figure 7. In our case, the selected device was an ESP32 Dev Module. Next, we set up the device with the available Wi-Fi to establish communication between the ESP32 and the IoT Cloud.

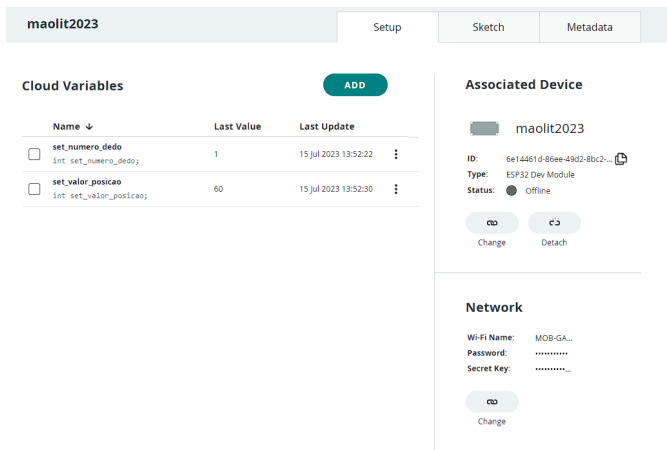


Fig. 7: Configuring a Device

4) *Creating Variables:* As shown in Figure 7, variables have been created that will be used both in the dashboard and in the code to facilitate integration between the commands sent from our Device to the IoT Cloud. Two integer-type variables have been created: "set_numero_dedo" is responsible for selecting the finger that performs the movement, and "set_valor_posicao" indicates the angle of movement for the servo motor.

5) *Editing the Sketch:* In the Sketch, shown in Figure 8, is where the programming is elaborated, and where we can upload the code to our device. The programming for this

project consists of a flow of data collection and execution, which is shared between the ESP32 and the IoT Cloud. Through the Dashboard, it is possible to choose the finger number we want to move and the desired movement angle.

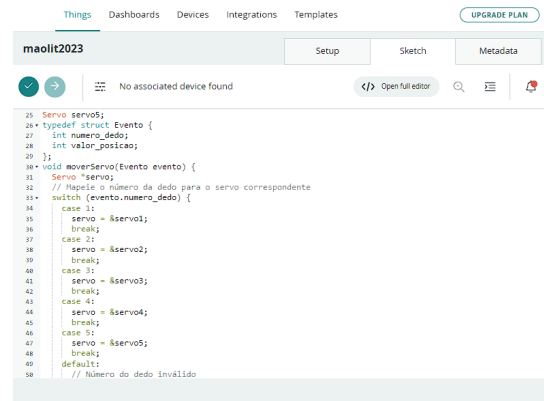


Fig. 8: Sketch

6) *Creating a Dashboard:* Here, we create the dashboard and define the WIDGETS with the variables previously created. The Arduino IoT Cloud provides various WIDGETS, and the ones that best suited the project were the "Value Selector" for choosing the finger to be moved and the "Slider" for controlling the servo motors' angle values, as shown in Figure 9.

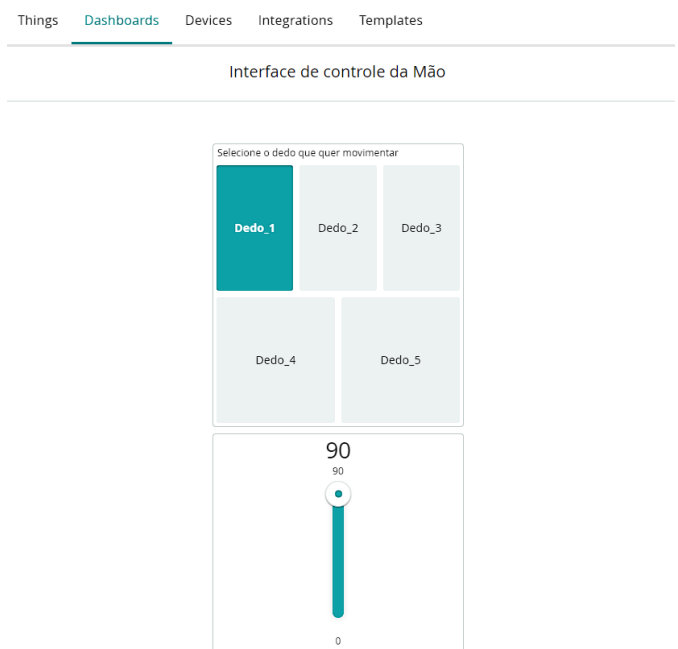


Fig. 9: Hand control interface.

III. RESULTS

The obtained results demonstrate that the combination of the ESP32 microcontroller with the Arduino IoT Cloud platform enabled efficient and remote control of the servo motors responsible for the robotic hand's movements. Through a simple and intuitive interface, it was possible to send movement commands to the robotic hand and receive real-time feedback information. The communication latency proved to be low, allowing for precise and responsive control of the device.

The developed device was tested in the laboratory with a new team of students and proved to be efficient in terms of teaching and learning.

IV. CONCLUSION

This article presented a successful application of the ESP32 microcontroller in operating a robotic hand through the Arduino IoT Cloud platform. The obtained results demonstrated that this technological combination offers an efficient and reliable solution for remote control of robotic devices. With the continuous advancement of these technologies, the use of the ESP32 microcontroller and Arduino IoT Cloud is expected to become increasingly widespread in the field of robotics, paving the way for new applications and significant advancements.

As we move forward, the successful integration of the ESP32 microcontroller and the Arduino IoT Cloud platform lays the foundation for a dynamic future in robotics. Furthermore, we envision a future where this technology enables robotics to play an even more significant role in areas such as healthcare, industry automation, and beyond, ultimately enhancing efficiency and improving the quality of life.

ACKNOWLEDGMENTS

We extend our heartfelt gratitude to IFCE (Federal Institute of Ceará), the LIT Laboratory (Technological Innovation Laboratory), the NEPEN Foundation, and the Iracema Institute for their invaluable infrastructure and financial support. Their contributions have been integral to the success and progress of our work.

REFERENCES

- [1] C. Jiménez-Camacho, J. Arana-Llanes, J. Gudiño-Lau, D. Vélez-Díaz, S. Charre-Ibarra and I. Domínguez-Jiménez, "Robotic arm with three degrees of freedom controlled by Arduino IoT cloud: first approach," 2022 XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob), Mineral de la Reforma/State of Hidalgo, Mexico, 2022, pp. 73-77, doi: 10.1109/COM-Rob57154.2022.9962316.
- [2] C. N. Oton and M. T. Iqbal, "Low-Cost Open Source IoT-Based SCADA System for a BTS Site Using ESP32 and Arduino IoT Cloud," 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, USA, 2021, pp. 0681-0685, doi: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666691.
- [3] ROY CHOWDHURY, Ankur. IoT and Robotics: a synergy. PeerJ Preprints, v. 5, p. e2760v1, 2017.
- [4] N. Kalubi and S. Sajal, "Cloud Computing: Arduino Cloud IoT Integration with REST API," 2022 IEEE International Conference on Electro Information Technology (eIT), Mankato, MN, USA, 2022, pp. 473-476, doi: 10.1109/eIT53891.2022.9814027.
- [5] T. Raaijen and M. Daneva, "Depicting the smarter cities of the future: A systematic literature review & field study," 2017 Smart City Symposium Prague (SCSP), Prague, Czech Republic, 2017, pp. 1-10, doi: 10.1109/SCSP.2017.7973352.

- [6] L. Sumi and V. Ranga, "Sensor enabled Internet of Things for smart cities," 2016 Fourth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), Wanknaghat, India, 2016, pp. 295-300, doi: 10.1109/PDGC.2016.7913163.
- [7] SOUZA, Daniel Silva de et al. Estudo da aplicação de um sistema IoT baseado no protocolo de comunicação MQTT a área da robótica industrial. 2018.

Towards Precision Agriculture: Development of a Neural Network Model for Quality Classification of Melons

Joao Pedro Mendes Albuquerque, Gabriela Teixeira Leite, Wellingson Rafael Teixeira da Costa,
Rejane Cavalcante Sá Rodrigues, Jorge Luiz Wattes Oliveira Junior and Tiago dos Santos Façanha
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Ceará

joao.pedro.mendes03@ifce.edu.br, gabriela.teixeira08@ifce.edu.br, wellingson.rafael.teixeira08@aluno.ifce.edu.br
rejane_sa@ifce.edu.br, jorge.junior@ifce.edu.br, tiago.facanha@ifce.edu.br

Abstract—This article presents a study on training a neural network model, using computer vision, to recognize and classify melons based on their quality. The objective of the study is to develop an autonomous system capable of accurately identify and classify melons, using quality information to assist in the process of selecting and classifying melons. The study uses a reference dataset consisting of images of melons along with information about their quality rating. The training methodology involves extracting visual features from the images, followed by training the model using deep learning techniques such as convolutional neural networks (CNNs). Study results are evaluated using performance metrics such as accuracy, precision and recall. The results obtained in this study demonstrate that the model was able to develop an accuracy test result of 0.6926 (69.26%) and a loss test result of 0.4876 (48.76%). This study contributes to the automation of the melon selection and classification process, providing significant benefits for the melon production and commercialization industry.

Index Terms—computer vision, machine learning, neural network.

I. INTRODUCTION

THE efficient and accurate grading of melons based on their quality has been a constant concern in the agricultural industry. Being able to accurately identify and grade melons and determine their suitability for sale is critical to ensuring high quality products for consumers and optimizing marketing and distribution processes.

Melon grading has historically been done using manual methods, with growers and artisans examining and grading each melon individually. However, this process is time-consuming, prone to human error, and limited in scalability and efficiency.

Recently, significant advances in computer vision and machine learning have allowed the development of automatic classification systems for fruits and vegetables. These systems use image processing algorithms and machine learning techniques to extract relevant fruit features and then classify them into specific categories.

The objective of this research is to develop and train a neural network model to identify and classify melons based on their quality. The use of these advanced image processing

techniques allows precise extraction of characteristics such as the quality of melons. Subsequently, machine learning algorithms such as convolutional neural networks (CNNs) and classification algorithms are used to sort the melons into two main categories: salable and non-salable.

Automating the melon selection process using these techniques is a significant advance in the agricultural industry. Classification accuracy and consistency are improved by reducing reliance on subjective assessments. In addition, automation allows for faster and more efficient processing, which increases productivity and reduces operating costs.

The results of this study are expected to advance fruit and vegetable sorting technology by providing an innovative and efficient solution for the agricultural industry. Implementing a trained neural network model to rank melons based on quality can significantly improve product ranking, streamline marketing and distribution processes, and increase consumer satisfaction.

II. THEORETICAL REFERENCE

Industrial automation began to gain prominence in society around the second half of the 18th century, in England. It refers to the application of technology and systems to optimize and control industrial processes, reducing the need for direct human intervention, through technologies of hardware and software. Increasing efficiency, productivity, quality, and safety in industrial operations.

A. Convolutional Neural Networks

Learning architectures designed to process grid-structured data. Capable of automatically learning relevant features in images through convolution and pooling layers, widely used in computer vision tasks.

B. Computer Vision

Computer vision is a field of artificial intelligence and image processing that focuses on the development of algorithms and systems that allow machines to interpret captured images with programmed purpose.

III. METHODOLOGY

The interest in this study arose from the need to predict future results in the automation of fruit selection, carried out in the area of industrial automation aimed at the agricultural area.

A. Data Collect

The melon prototypes were manufactured using 3D printing technology and placed on a conveyor belt to simulate the sorting process. Photographs were taken of suitable and unsuitable melons. These photographs were captured using a high-resolution webcam and stored in digital format.

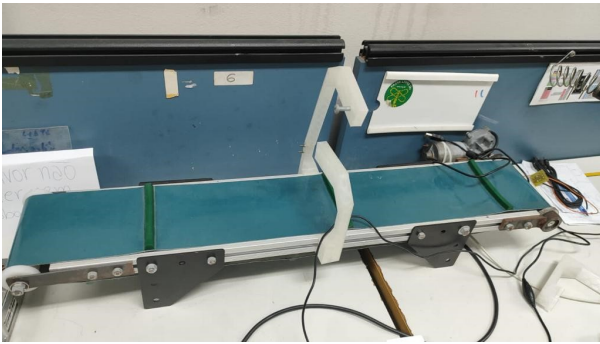


Fig. 1: Conveyor belt used to place the melons.



Fig. 2: Melon prototypes manufactured by using 3D printing technology.

B. Data Preparation

The captured images were processed and pre-processed to ensure data quality and consistency. This involved resizing the images, correcting colors, and eliminating unwanted noise or artifacts.

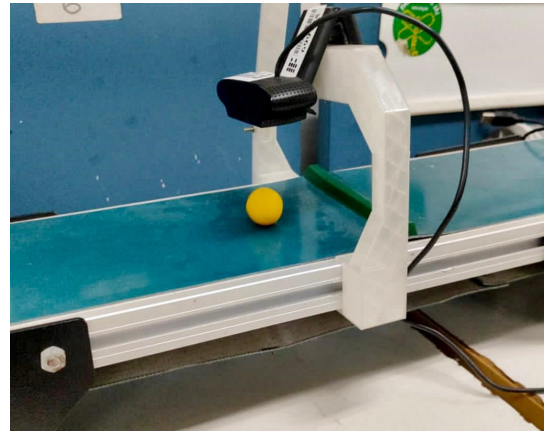


Fig. 3: How the photos of the melons were made



Fig. 4: Melons used in the project

C. Data annotation

Each image was annotated by code automation, identifying the areas of interest that corresponded to the melons in the images. Annotations were performed using a specific annotation tool to mark the relevant regions of the melons in each image.



Fig. 5: Example of melon used as appropriate.



Fig. 6: Example of melon used as inappropriate.

D. Data division

The dataset was divided into training and test sets. Proper splitting of the data is crucial to ensure an accurate assessment of model performance.

E. Construction of the neural network model

Using the Python programming language and specific machine learning libraries, such as TensorFlow and Keras, a convolutional neural network (CNN) model was built. The CNN architecture was defined, including the choice of convolutional layers, pooling layers, and fully connected layers.

```
model = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Conv2D(128, (3, 3), activation='relu', input_shape=(h_parameters["img_height"], h_parameters["img_width"], 3)),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    tf.keras.layers.Conv2D(64, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (3, 3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D((2, 2)),
    tf.keras.layers.Flatten(),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(128, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(h_parameters["num_classes"], activation='softmax')
])
```

Fig. 7: Neural Network Layers.

F. Model Training

The CNN model was trained using the annotated dataset. During training, neural network parameters were iteratively adjusted to minimize the loss function and optimize model performance. Training involved feeding the training data into the neural network.

```
h_parameters = {
    "batch_size": 80,
    "img_height": 80,
    "img_width": 80,
    "num_classes": len(labels),
    "epochs": 75,
}
```

Fig. 8: Hyperparameters passed to CNN.

G. Model evaluation

The performance of the CNN model was evaluated using the validation dataset. Performance metrics such as accuracy, precision and recall were calculated to assess the model's ability to correctly recognize melons in the images.

H. Model testing

The trained model was then tested using the test dataset, which was not used during training. This allowed us to assess the model's ability to generalize to new data and provide a realistic estimate of its performance in practice.

I. Model Tuning and Optimization

If necessary, the CNN model was refined by tuning hyperparameters such as learning rate, batch size, and neural network architecture. This was done to improve the performance and efficiency of the model.

J. Analysis and interpretation of results

The results obtained during the evaluation and testing of the model were analyzed and interpreted. This involved analyzing the performance metrics, visually evaluating the model's predictions, and comparing them to human annotations.

```
Epoch 60/60
1/16 [>.....] - ETA
2/16 [==>.....] - ETA
3/16 [===>.....] - ETA
4/16 [====>.....] - ETA
5/16 [=====>.....] - ETA
6/16 [=====>.....] - ETA
7/16 [=====>.....] - ETA
8/16 [=====>.....] - ETA
9/16 [=====>.....] - ETA
10/16 [=====>.....] - ETA
11/16 [=====>.....] - ETA
12/16 [=====>.....] - ETA
13/16 [=====>.....] - ETA
14/16 [=====>.....] - ETA
15/16 [=====>..] - ETA
16/16 [=====] - ETA
16/16 [=====] - 14s
871ms/step - loss: 0.5028 - accuracy: 0.773
5 - val_loss: 0.7040 - val_accuracy: 0.5562
1/3 [=====>.....] - ETA:
2/3 [=====>.....] - ETA:
3/3 [=====] - ETA:
3/3 [=====] - 1s 24
4ms/step - loss: 0.4876 - accuracy: 0.6926
test loss: 0.48758623003959656
test accuracy: 0.6926407217979431
```

Fig. 9: Test results

K. Final considerations

Based on the results and analysis performed, final considerations were presented on the viability and effectiveness of the CNN model for classifying melons on the treadmill. The benefits and limitations of the model were discussed, as well as possible future research directions and improvement of the methodology used.

IV. CONCLUSION

Based on the study carried out, it is concluded that the application of precision agriculture, which involves the use of a neural network model to classify melon quality, can play an important role in improving agricultural production. The use of machine learning techniques and neural networks allows the melon sorting process to be automated, allowing for faster and more accurate analysis, reducing manual work, and improving efficiency.

The test results showed, by collecting data from multiple variables such as size, color, texture, and other relevant characteristics, that the model had an accuracy of 69% and a loss of 48%. This means that the model was able to correctly classify 69% of the test images but made errors in 48% of the images. The 48% loss is relatively high, which suggests that the model can still be improved. However, the overall results are promising, and the model has the potential to be used to classify fruit images with high accuracy.

In addition, the adoption of this classification model in precision agriculture can bring significant benefits to producers. The ability to automatically identify and separate high and low-quality melons can optimize the harvest, improve the efficiency of the packaging and delivery process, and increase consumer satisfaction.

However, it is important to emphasize that the application of this model requires accurate and reliable collection of training data, as well as adaptation of the model to different melon varieties and growing conditions.

In short, this study highlights the importance and potential of precision agriculture in the production of melons through an efficient neural network model to classify them according to their quality. This approach can help improve production efficiency, reduce costs, and improve the quality of agricultural products, which will greatly contribute to the agricultural sector.

REFERENCES

- [1] DEB, Sayantini. TensorFlow Image Classification - Build your own Classifier. 2019. Available in: <https://medium.com/edureka/tensorflow-image-classification-19b63b7bfd95>. Access in: 04 jul. 2023
- [2] PAJANKAR, Ashwin. Raspberry Pi Computer Vision Programming. Birmingham: Packt Publishing, 2015.
- [3] CHEN, Fei; WANG, Xiaodong; ZHAO, Yunxiang. Visual object tracking: A survey. In: ELSEVIER (Estados Unidos). Computer Vision and Image Understanding. California: Sciencedirect, 2022. Cap. 222, p. 103508. Available in: <https://www.sciencedirect.com/journal/computer-vision-and-image-understanding>. Access in: 04 jul. 2023.
- [4] AFSHINE AMIDI (Estados Unidos) (org.). Convolutional Neural Networks cheatsheet. Available in: <https://stanford.edu/~shervine/teaching/cs-230/cheatsheet-convolutional-neural-networks>. Access in: 05 jul. 2023.

Hidden dynamics enhance the stability of switched control systems

Christian Erazo O.¹ y Nelson L. Díaz²

Shell *et al.*: Titulo Abstract—This paper investigates the role of hidden dynamics in influencing the stability of sliding solutions within control-switched systems. Through a careful selection of the switching surface, it is demonstrated that the sliding dynamics can be extended, leading to a notable expansion of the system's region of attraction, consequently introducing new robustness properties. Numerical computations of the basin of attraction for a nonlinear switched system are performed to highlight the advantages of adding hidden terms to the switching surface.

Index Terms—multiple sliding modes, Filippov systems, and cell-to-cell mapping.

I. INTRODUCTION

SWITCHING dynamics arise in diverse applications, ranging from electronic circuits [1], biological processes [2], social or economic modeling [3] and mechanical systems [4]. Additionally, dynamical systems can commute between different operational modes through exogenous control laws such as the well-known Sliding Mode Control [5]. Multiple control techniques have succeeded in ensuring global stability for switched systems; However, there are cases where, due to the system's complexity or large disturbances, the coexistence of unstable, chaotic, periodic, or sliding solutions, among others, can occur [6], [7].

The set of initial conditions that lead to a particular solution is called the basin of attraction which is a measure of how stable the attractor is. Typically, Lyapunov methods based on common and multiple functions are used to estimate these basins of attraction [8], [9]. In [10] the approach of different inclusions is utilized to extend the initial set of the domain of attraction for switched linear systems under saturation. An iterative algorithm based on the sum of squares formulations and Lyapunov functions is used to compute the basins of attraction for discrete-time switched systems [11]. By increasing the distance between equilibria the authors in [12] enlarge the basin of attraction of a multi-stable switching system. In [13] control gains are tuned through the use of the norm of saltation matrix, resulting in a wide stability range for power converters. The hidden dynamics introduced in [14], [15] refer to the behavior over the switching surface governed by nonlinear sliding modes that vanish outside of the switching surface. This approach has been applied to model discontinuities present in rigid body systems, hydraulic systems with valves, climate models, neuronal models and more [16].

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia. ORCID: 0000-0003-4236-362X

² Doctorado en Ingeniería, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia. ORCID: 0000-0003-0202-0489

Some examples have demonstrated that hidden dynamics can cause solutions to adhere to the switching surface and slide along it, resulting in the emergence of new behaviors [4]. In this paper, we explore the effect of adding hidden terms to the switching control law through the computation of the basin of attraction for a nonlinear system. The document is organized as follows: a brief description of switched control systems is presented in Section II. The incorporation of hidden terms into the switching control law is described in Section III, followed by the computation of the basin of attraction for nonlinear switched systems under hidden dynamics in Section IV, and concluding remarks are provided in Section V.

II. SWITCHED CONTROL SYSTEMS

Switched feedback systems are dynamic systems described as

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + u \\ u = -\mu \cdot \text{sgn}(h) \end{cases} \quad (1)$$

where $f(x)$ is a nonlinear piecewise continuous vector field having a codimension-one submanifold Σ defined as the zero set of a smooth scalar function $h(x)$. The control signal u is discontinuous with a constant gain μ . Such a system can be rewritten in the Filippov formalism [17] as

$$\dot{x} = f(x) = \begin{cases} f_1(x), & x \in R_1, \\ f_2(x), & x \in R_2, \end{cases} \quad x(0) = x_0 \in \mathbb{R}^n \quad (2)$$

where f_1 and f_2 are smooth vector fields, $R_1 = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) > 0\}$, $R_2 = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) < 0\}$ and $\Sigma = \{x \in \mathbb{R}^n : h(x) = 0\}$. The dynamics on Σ are the well-known sliding if both vector fields f_1 and f_2 point towards Σ , i.e. $\mathcal{L}_{f_1}h(x) \cdot \mathcal{L}_{f_2}h(x) < 0$, $\mathcal{L}_{f_1}h(x) < 0$. The open subset $\hat{\Sigma} \subset \Sigma$ is referred to as the *sliding surface*. Here, $\mathcal{L}_{f_{1,2}}h(x) := \nabla h(x) \cdot f_{1,2}(x)$ is defined as the Lie derivative of $h(x)$ with respect to the vector field $f_{1,2}$. Once the evolution of the system reaches the sliding surface, the dynamics can be defined as a linear combination of the vector fields (f_1 and f_2), namely:

$$\dot{x} = f_{\Sigma}(x), \quad x \in \hat{\Sigma} \quad (3)$$

where:

$$f_{\Sigma}(x) = \frac{f_1(x) + f_2(x)}{2} + \frac{f_1(x) - f_2(x)}{2}s(x), \quad (4)$$

and $-1 \leq s(x) \leq 1$. Since the motion is constrained to $\hat{\Sigma}$, f_{Σ} must be tangent to $\hat{\Sigma}$, i.e. $\mathcal{L}_{f_{\Sigma}}(h)(x) = 0$, which yields

$$s(x) = -\frac{\mathcal{L}_{f_1+f_2}(h)(x)}{\mathcal{L}_{f_1-f_2}(h)(x)}. \quad (5)$$

On the other hand, the trajectory of the system leaves the sliding region as soon as the vector fields $f_{1,2}$ become tangent to Σ , that is, when any of these conditions are satisfied: $\mathcal{L}f_1h(x) = 0$ or $\mathcal{L}f_2h(x) = 0$.

III. ENLARGING STABILITY OF SWITCHED SYSTEMS

The term *hidden dynamics* introduced in [14], refers to extending the sliding surface over the crossing regions by adding terms with a nonlinear dependence of s that disappear outside the switching manifold Σ hence they are *hidden* in (2). Considering the switched systems (2), the sliding equations under the hidden dynamics approach reads

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_{\Sigma}^{nl} \\ f_{\Sigma}^{nl} &= \frac{1}{2} [1 + s] f_1(x) + \frac{1}{2} [1 - s] f_2(x) + G(s)\gamma(s) \end{aligned} \quad (6)$$

where $G(s)$ is any nonlinear function of s and $\gamma(s)$ satisfies

$$\gamma(s) \in \begin{cases} 0 & \text{if } |s| = 1 \\ [0, 1] & \text{if } |s| < 1 \end{cases} \quad (7)$$

To determine if such dynamics are attractive or repellent, we can check whether the trajectories outside of $h(x)$ converge toward the sliding surface or not. This can be evaluated through the following relation

$$z(x, s) := \frac{\partial}{\partial s} (f(x, s) \cdot \nabla h(x)) < 0 \quad (8)$$

where (6) is attracting if $z(x, s)$ is negative, and repelling if $z(x, s)$ is positive. Places where there exist sliding motions where the vector field f is tangent to Σ for one or more values of s^* , allowing the flow slides along Σ . The nonlinear sliding region is given by $\hat{\Sigma}^{nl} = \{x \in \Sigma : f(x, s) \cdot \nabla h(x) \neq 0\}$, places where there are no sliding dynamics, define the nonlinear crossing regions, $\Sigma^{nc} = \{x \in \Sigma : f(x, s) \cdot \nabla h(x) = 0\}$ such that, $\Sigma = \hat{\Sigma}^{nl} \cup \Sigma^{nc}$.

Following this idea, the stability of the sliding mode for the system (2) can be extended by rewriting the control action u as

$$u_{ns} = -\mu \left[\text{sgn}(h) + \hat{\alpha} \text{sgn}(h) (1 - \text{sgn}(h)^2) \right] \quad (9)$$

or

$$u_{ns} = -\mu [s + \hat{\alpha} s (1 - s^2)], \quad s = \text{sgn}(h) \quad (10)$$

where $\hat{\alpha}$ is a constant parameter that increases the basins of attraction of the sliding mode. Note that according to (6), $\gamma = 1 - s^2$ and $G = \hat{\alpha} s$.

IV. EXAMPLES

Consider a nonlinear switched system

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = 3x_1^2 + u, \end{cases} \quad (11)$$

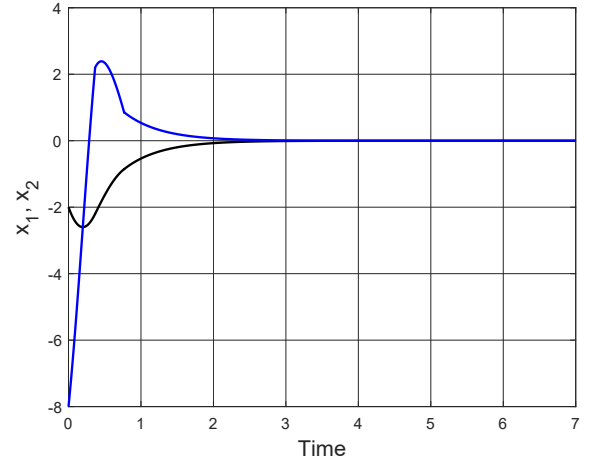
controlled by $u = -10 \text{sgn}(x_2)$. According to (2) the system reads

$$f_1(x) = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 \\ 3x_1^2 - 10 \end{bmatrix}, f_2(x) = \begin{bmatrix} -x_1 + x_2 \\ 3x_1^2 + 10 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

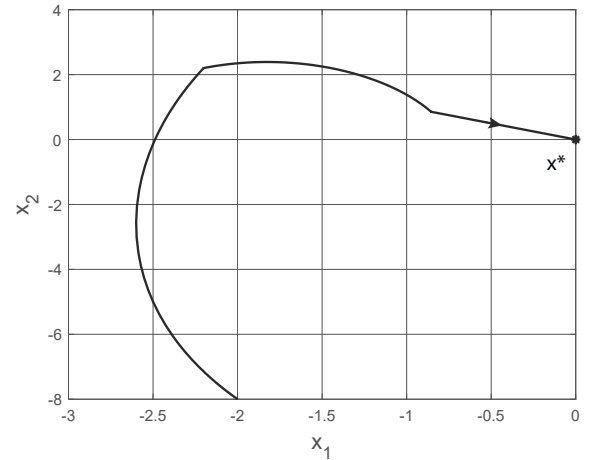
with $h(x) = x_2$ and $s = \text{sgn}(h)$. In the linear sliding model, the dynamics will be constrained to

$$\hat{\Sigma} = \left\{ x \in \mathbb{R}^2 : -\frac{10}{3} < x_1 < \frac{10}{3} \right\} \quad (13)$$

Numerical solutions are displayed in Fig. (1) (a) and (b). It is shown that the system exhibits sliding solutions giving rise to a stable pseudo-equilibrium point (x^*) on the switching surface Σ . To compute the basins of attraction of the equilibrium point



(a)



(b)

Fig. 1. Numerical simulations of (11) regarding linear sliding modes: (a) time evolution and (b) phase portrait. The trajectory solution starts with initial condition $(x_1, x_2) = (-2, -8)$.

we use cell-to-cell mapping algorithm presented in [7]. Fig. 2 displays the basins of attraction of the equilibrium point $x^* = (0,0)$, where the region colored in red belongs to its basin of attraction, while initial conditions in the blue region are mapped outside.

Now, to extend the basins of attraction of the equilibrium point x^* , we use the control law (9), for $\hat{\alpha} = 20$, i.e.

$$u_{ns1} = -10 \left[\text{sgn}(h) + 20 \text{sgn}(h) (1 - \text{sgn}(h)^2) \right] \quad (14)$$

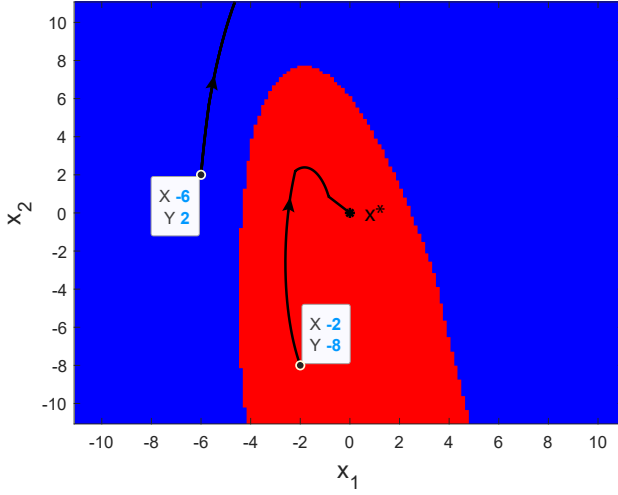


Fig. 2. Basins of attraction for the sliding control problem (11), for an initial resolution of 11×11 grid of cells. Black curves stand for trajectories inside and outside of the BA of x^*

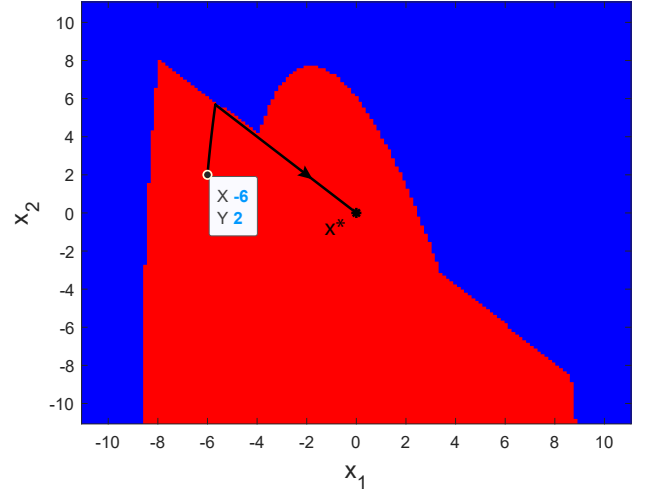


Fig. 4. Basins of attraction for the sliding control problem (11), for an initial resolution of 11×11 grid of cells and $\hat{\alpha} = 20$

Fig (3) indicates an extension of the basins of attraction of the equilibrium point x^* , thus the control law u_{ns1} introduces new invariant regions which enhance the robustness properties of the system.

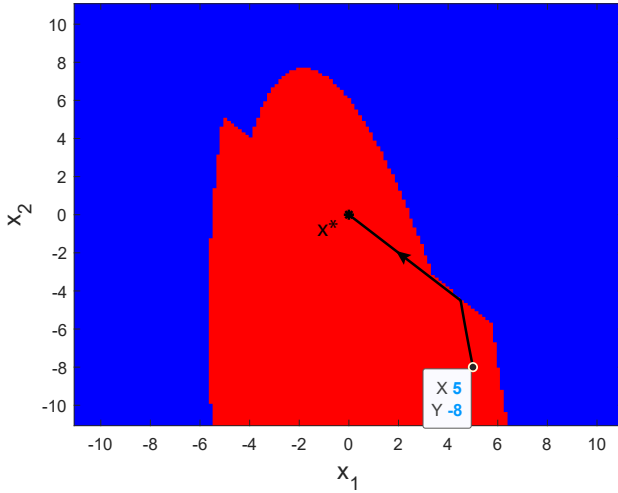


Fig. 3. Basins of attraction for the sliding control problem (11), for an initial resolution of 11×11 grid of cells and $\hat{\alpha} = 10$

V. CONCLUSIONS

The results presented in this paper indicate the importance of hidden dynamics in the stability of the sliding solutions. A particular selection of the switching surface causes the extension of the sliding dynamics, allowing the increase of the system's region of attraction, specifically for larger values of $\hat{\alpha}$. It is worth mentioning that hidden terms can cause multiple sliding dynamics to alternate between attraction and repulsion, leading to an asymmetric shape for the region of

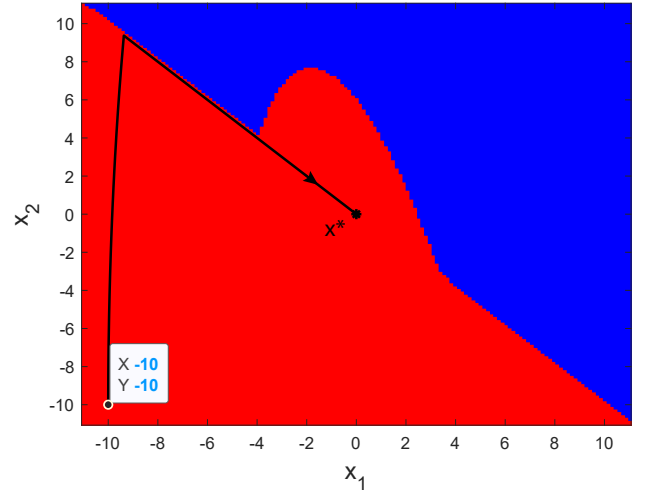


Fig. 5. Basins of attraction for the sliding control problem (11), for an initial resolution of 11×11 grid of cells and $\hat{\alpha} = 50$

attraction. The selected hidden terms (9) extend the sliding surface symmetrically, which, in turn, introduces new robustness properties, desirable when large disturbances are present in the system.

REFERENCES

- [1] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23–36, 1993.
- [2] R. Edwards, A. Machina, G. McGregor, and P. Van den Driessche, "A modelling framework for gene regulatory networks including transcription and translation," *Bulletin of mathematical biology*, vol. 77, no. 6, pp. 953–983, 2015.
- [3] J. A. Amador, J. M. Redondo, G. Olivar-Tost, and C. Erazo, "Cooperation-based modeling of sustainable development: An approach from filippov's systems," *Complexity*, vol. 2021, pp. 1–16, 2021.
- [4] M. R. Jeffrey, *Hidden Dynamics: The Mathematics of Switches, Decisions and Other Discontinuous Behaviour*. Springer, 2018, vol. 40, no. 1.

- [5] V. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977.
- [6] Y. Abbasi, H. R. Momeni, and A. Ramezani, "Robust tube-based mpc with enlarging the region of attraction for tracking of switched systems," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 358, no. 17, pp. 8886–8913, 2021.
- [7] C. Erazo, M. E. Homer, P. T. Piironen, and M. Di Bernardo, "Dynamic cell mapping algorithm for computing basins of attraction in planar filippov systems," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 27, no. 12, p. 1730041, 2017.
- [8] J. Xie and J. Zhao, "H-inf model reference adaptive control for switched systems based on the switched closed-loop reference model," *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 27, pp. 92–106, 2018.
- [9] J. Zhao and D. J. Hill, "On stability, l2-gain and h inf control for switched systems," *Automatica*, vol. 44, no. 5, pp. 1220–1232, 2008.
- [10] M. Dehghan, C.-J. Ong, and P. C. Chen, "Enlarging domain of attraction of switched linear systems in the presence of saturation nonlinearity," in *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. IEEE, 2011, pp. 1994–1999.
- [11] X. Zheng, J. Lu, and Z. She, "Inner-approximations of domains of attraction for discrete-time switched systems with arbitrary switching," in *2017 IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC)*. IEEE, 2017, pp. 6531–6536.
- [12] L. Ontañón-García and E. Campos-Cantón, "Widening of the basins of attraction of a multistable switching dynamical system with the location of symmetric equilibria," *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 26, pp. 38–47, 2017.
- [13] J.-G. Muñoz, A. Pérez, and F. Angulo, "Enhancing the stability of the switched systems using the saltation matrix," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 19, no. 05, p. 1941004, 2019.
- [14] M. R. Jeffrey, "Hidden dynamics in models of discontinuity and switching," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 273, pp. 34–45, 2014.
- [15] M. R. Jeffrey, M. R. Jeffrey, and Chernyk, *Hidden dynamics*. Springer, 2018.
- [16] I. Belykh, R. Kuske, M. Porfiri, and D. J. Simpson, "Beyond the bristol book: Advances and perspectives in non-smooth dynamics and applications," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 33, no. 1, 2023.
- [17] A. F. Filippov and F. M. Arscott, *Differential equations with discontinuous righthand sides: control systems*. Springer Verlag, 1988, vol. 18.

Simulación de aglomeraciones de domiciliarios usando lógica difusa.

José David Silva¹, Lindsay Álvarez Pomar²
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Resumen—Debido al auge de las aplicaciones de economía compartida como: Rappi, Uber eats, Domicilios.com, entre otras aplicaciones, los domiciliarios de comidas se agrupan en ciertos puntos específicos de la ciudad de Bogotá. La comprensión de este fenómeno emergente puede ser base para la toma de decisiones sobre la ubicación de los sitios de descanso de domiciliarios que exige la ciudad de Bogotá a las compañías de domicilios basadas en inteligencia colectiva. A partir de fuentes primarias se recolectó información que posteriormente se depuró, mediante métodos estadísticos y expertos, obteniendo así las variables relevantes que permitieron formular un modelo y determinar la metodología de simulación adecuada para este caso. A diferencia de la hipótesis inicial donde se creía que la principal motivación por la que los domiciliarios se aglomeran en puntos específicos de la ciudad era encontrar el mayor número de pedidos (ingresos), factores como: la seguridad, la comodidad y principalmente la amistad, resultaron determinantes para explicar dichas aglomeraciones. La homogeneidad de las características generales entre la población que trabaja como domiciliario resulta ser un factor clave para explicar la emergencia de clústeres en puntos específicos de la ciudad.

Palabras Clave—Domiciliary, Third-party delivery platform, Simulation .

I. INTRODUCCIÓN

EL sector de la industria de restaurantes ha experimentado un gran crecimiento en las entregas a domicilio; el uso de la tecnología ha facilitado los pedidos y las entregas, principalmente por la creación de plataformas que hacen uso de inteligencia colectiva. Básicamente, estas plataformas permiten que cualquier persona sea un potencial domiciliario, sin restricciones de tiempo, ni de permanencia. Los restaurantes han encontrado una nueva posibilidad de llegar a los clientes y de entregar los productos a domicilio rápidamente y a costos más bajos.

El auge de estas tecnologías ha ofrecido oportunidades de trabajo a muchas personas, pero también ha generado aglomeraciones de diversos tamaños de domiciliarios en las ciudades mientras esperan a que se generen pedidos en puntos específicos de las ciudades [1]. Estas aglomeraciones afectan la movilidad peatonal y se perciben como inseguras. En la ciudad de Bogotá se reglamenta la actividad mediante el decreto 082 de 2021 que establece estándares para el uso del espacio público, unas obligaciones para toda la cadena de valor, entre aliados, comerciales, plataformas y domiciliarios para el respeto por el espacio público.

Algunos estudios realizados y enfocados al fenómeno de las plataformas de economía compartida, como el realizado por [2], han desestimado el por qué y cómo se han formado estas aglomeraciones en puntos específicos de las ciudades, y han partido obviando este hecho centrándose en optimizar la ubicación de los domiciliarios con el objetivo de maximizar los ingresos de las plataformas.

En diversos estudios de inteligencia colectiva se demuestra cómo grupos de agentes interactúan y se coordinan entre sí, organizándose en ausencia de controles externos con el fin de cumplir un objetivo [3], [4]. Un ejemplo de ello es el estudio realizado por [5] donde denotan rasgos sociales complejos en los insectos quienes exhiben una marcada diversidad en su organización concluyendo que la complejidad de un insecto resulta insuficiente para explicar la complejidad de una colonia de ellos.

Estas mismas estrategias de inteligencia colectiva se practican en negocios como Amazon (Reviews), E-Bay (Subastas), Wikipedia (Edición de enciclopedia) y Google (Con su algoritmo de ranquear páginas por popularidad) donde un grupo de individuos colaboraron o compitieron con otros provocando que inteligencias o comportamientos que no existían, emergieran lentamente alcanzando así el éxito de sitios webs como los anteriormente nombrados [6].

Por otro lado, se han desarrollado distintas metaheurísticas de inteligencia para estudios organizacionales, entre las que figuran colonias de hormigas e inteligencias de enjambre, las cuales han sido usadas exitosamente en diversas situaciones permitiendo el hallazgo de buenas soluciones [3].

Este estudio responde a la necesidad de entender por qué los domiciliarios urbanos se aglomeran en ciertos sitios de manera autoorganizada, por medio de acciones individuales que eventualmente dentro de la comunidad se vuelven norma, como resultado de la inteligencia colectiva [4]. La comprensión de este fenómeno emergente puede ser base para la toma de decisiones sobre la ubicación de los sitios de descanso de domiciliarios que exige la ciudad de Bogotá a las compañías de domicilios basadas en inteligencia colectiva.

II. FORMACION DE AGLOMERACIONES

Básicamente los domiciliarios se ubican en zonas donde haya solicitudes de pedidos, ya que la principal razón para trabajar como domiciliario es la compensación económica. Los clientes hacen pedidos a través de una plataforma online y se genera una alerta de necesidad de hacer un domicilio a los domiciliarios que se encuentran en la zona. Una vez que un

¹ José David Silva e-mail: josedavidsa2@gmail.com

² Lindsay Álvarez Pomar es profesora Asociada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 111611 Bogotá, Colombia. (e-mail: lavarez@udistrital.edu.co).

domiciliario acepta la entrega, se debe acercar al restaurante, recoger el pedido y llevarlo al cliente. Entre una solicitud y otra, el domiciliario debe esperar y puede hacerlo en compañía de otros domiciliarios.

Este tipo de comportamiento se da porque los grupos de personas tienen inteligencia colectiva, que es una propiedad del grupo y no solo de los individuos que lo componen [7], es una inteligencia repartida por todas partes [8] y que se define como un grupo de individuos actuando colectivamente de formas que parecen inteligentes [9].

La inteligencia colectiva es inevitable en un sistema social y puede incluso desarrollarse hasta una escala organizacional pasando por el estudio del individuo, de sus relaciones interpersonales, de su comportamiento como parte funcional de un grupo hasta llegar al desarrollo de actividades que desembocan en el desempeño organizacional [10].

III. SIMULACION DE LAS AGLOMERACIONES

Como primer paso se identifican variables relacionadas con la emergencia de aglomeraciones de domiciliarios de una compañía de domicilios en distintas zonas de la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de una entrevista a 20 domiciliarios en tres puntos geográficos diferentes. Se aplicaron preguntas cerradas y preguntas abiertas, en la primera sección se consultó información que ayudó a definir al segmento de la población al que pertenecen, como por ejemplo la nacionalidad, la edad, el estado civil, entre otras preguntas. En la sección de preguntas abiertas se consultó información con el objetivo de establecer los principales factores que hacen que los domiciliarios decidan permanecer o no en un sitio geográfico específico.

Después de haber entrevistado a 20 domiciliarios se ha podido encontrar factores comunes entre los entrevistados como la nacionalidad y el sexo, además se encontraron causas comunes por las que una de estas personas puede aglomerarse o no en un determinado espacio geográfico para realizar su actividad económica.

El 89% de los encuestados son de nacionalidad venezolana, igualmente, otro punto importante es que el 100% de los entrevistados fueron hombres. Vale la pena destacar que al cuestionar a los entrevistados sobre los factores más importantes para ellos al momento de establecerse en un sitio determinado, sorprende que el tipo de compañeros que pueden encontrar en las distintas zonas geográficas en las que pueden laborar resulta determinante para que estos decidan establecerse o no en un lugar, porque ellos encontraron al ingresar a dicha ocupación un estilo de vida de ocio y compañerismo durante el trabajo que mitiga las deplorables condiciones laborales de ser domiciliario de una aplicación web, además factores como la seguridad y la comodidad son más relevantes que el número de pedidos que les puedan aparecer en las aplicaciones. En este orden de ideas al contrario de lo comúnmente pensado el ingreso monetario no es el factor que ellos más tienen en cuenta para darle la oportunidad a un sitio para establecerse, pero el criterio más importante para abandonar un sector es el número de pedidos (ingreso monetario). Según los resultados de las entrevistas

el factor más importante para que los domiciliarios le den o no la oportunidad a un sector para establecerse es la amistad que haya entre los miembros del clúster; por otro lado, el número de pedidos es la razón más importante para que estas personas decidan buscar un nuevo sitio, estas variables serán determinantes para el modelo a simular. Para llegar a una aproximación de lo que es una relación de amistad, se usa la definición dada por Samer: para que exista una relación de amistad entre dos personas es indispensable que estas personas tengan al menos una conversación y que exista una similitud entre ellos (homogeneidad), como por ejemplo el estrato social, afinidad religiosa y/o política, entre otros factores [11]. Se hace uso de la lógica difusa para segmentar la población de domiciliarios para encontrar homogeneidad entre los grupos a partir de variables como la edad, estado civil, el número de hijos, entre otros. De acuerdo con Euroinova (2022) las etapas de la adultez se dividen de la siguiente manera: adulto joven de los 25 a los 40 años, adulto intermedio entre los 40 a 50 años y adulto tardío de los 50 a los 60 años. La segmentación de la edad de las personas adultas, servirá de insumo para construir una matriz en la cual se pueda dividir las etapas de la adultez para la construcción del modelo multiagente. La división se realizará a través de una fuzzificación, donde inicialmente se realizarán dos gráficos, uno para domiciliarios sin hijos/matrimonio y otros con hijos/matrimonio para delimitar el tipo de persona (ver Fig. 1 y Fig.3).

Las reglas que se utilizarán para definir la categoría de las personas y así medir su homogeneidad son las siguientes:

- sí es joven y no tiene hijos: baja
- sí es joven y tiene 1 hijo: media/alta
- sí es maduro y no tiene hijos: baja
- sí es maduro y tiene hijos: media/alta
- sí es adulto: media/alta
- sí es maduro y tiene hijos: media/alta
- sí es adulto: media/alta

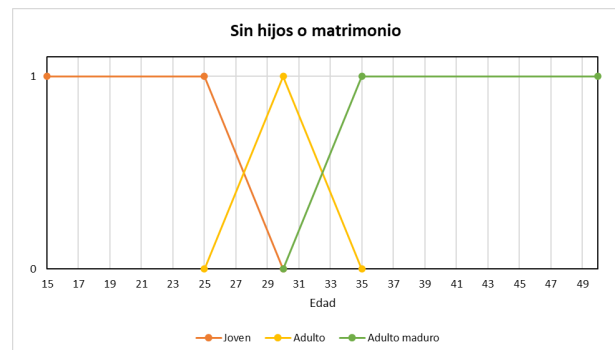


Figura 1. Sin hijos o matrimonio..

Finalmente, con las variables obtenidas a partir de la edad y condición del domiciliario se desfuzzificarán como se muestra en la Fig 3.

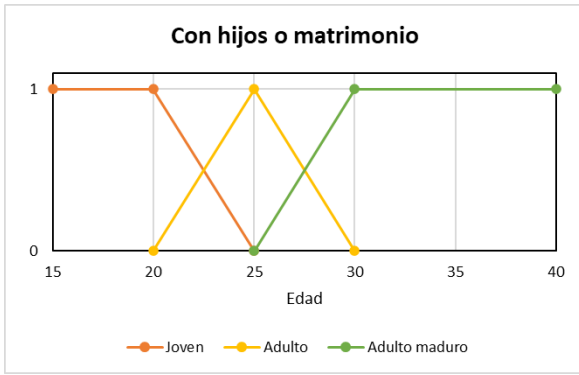


Figura 2. Con hijos o matrimonio.

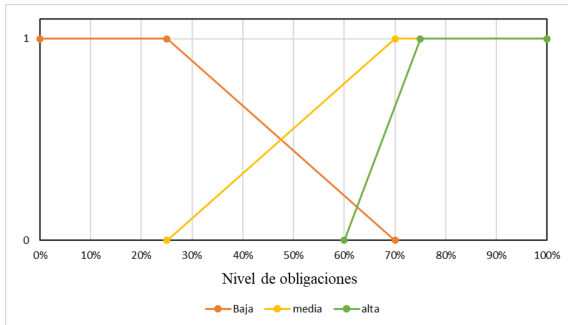


Figura 3. Nivel de obligaciones.

$$\begin{aligned}
 \text{Joven sin hijos} & \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 25 \\ -\frac{x}{5} + 6, & 25 \leq x < 30 \\ 0, & 30 \leq x < 60 \end{cases} \\
 \text{Adulto} & \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 25 \\ \frac{x}{5} - 5, & 25 \leq x < 30 \\ -\frac{x}{5} + 7, & 30 \leq x < 35 \\ 0, & 35 \leq x < 60 \end{cases} \\
 \text{Adulto maduro} & \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 30 \\ \frac{x}{5} - 6, & 30 \leq x < 35 \\ 1, & 35 \leq x < 60 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Se supone que una obligación media empieza a partir del 60 %. Si queremos calcular el nivel de obligaciones de una persona de 29 años sin hijos tendríamos que su nivel de obligaciones dadas las reglas (y) es del 61 % :

Nivel de obligaciones

$$\begin{aligned}
 &= \left(-\frac{29}{5} + 6 \right) * 0.25 + \left(\frac{29}{5} - 5 \right) * 0.7 \\
 &= 0.61
 \end{aligned}$$

En este caso 0.25 es dónde finaliza la obligación baja y 0.7 donde empieza la media. Se aplica el mismo método para todos los casos y se obtiene el nivel de obligaciones para los dos escenarios según la edad; de esta manera se crean los dos perfiles para los agentes según el nivel de obligaciones calculado a partir de la edad del domiciliario y su estado civil/número de hijos (en Netlogo para disminuir el procesamiento se parametriza el rasgo del agente a partir de la condición y la edad del domiciliario).

IV. VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se corrió la simulación en el software Netlogo. El número de corridas es 13 con un largo de corrida de 30.000 ticks. Se simula y grafica el nivel de ocupación de los domiciliarios y por inspección gráfica se estima la estabilidad del sistema entre el tick 5.000 y 15.000, rango en el que se toman los datos. La ocupación de clústeres por parte de los domiciliarios promedio fue del 84.79 % con una desviación estándar de 9.46. Dados los parámetros establecidos de 13 simulaciones realizadas, únicamente en una simulación hubo equidad, ningún domiciliario se quedó sin clúster y dejó de haber abandonos (100 % de ocupación). En cuanto a las proporciones en los clústeres arrojadas por el modelo y comparadas con la realidad hay una confianza por el 95 % en los resultados.

V. CONCLUSIONES

Al contrastar la hipótesis propuesta inicialmente con los hallazgos posteriormente obtenidos, se encontraron factores que no se tenían en cuenta. En principio se tenía la creencia que la mayor motivación de los domiciliarios era encontrar los puntos óptimos en donde recibirían el mayor número de pedidos, para así generar mayores beneficios económicos.

A partir de los resultados obtenidos en las entrevistas, se evidenciaron factores imprevistos en los que los domiciliarios se basaban para permanecer en un clúster tales como: la amistad, la comodidad y la seguridad; factores que para algunos domiciliarios pueden ser más importantes que el dinero. También se encontró que los clústeres, además de ser puntos estratégicos (en cuanto al número de pedidos), encontrados a partir de la interacción de los domiciliarios (inteligencia colectiva) como se planteó inicialmente, están conformados por personas de rasgos homogéneas. El 95 % de los domiciliarios entrevistados son personas extranjeras en una condición vulnerable y con pocas posibilidades de trabajar en un sector diferente.

Al ser personas con un mismo origen y una condición muy similar, en el esfuerzo de parametrizar esta homogeneidad, se infirió estadísticamente un nivel de responsabilidad entre personas jóvenes y adultas a partir de la edad, estado civil y número de hijos permitiendo así que los agentes establezcan vínculos de amistad entre ellos. Se encontraron dos tipos de personas: unas, de edad madura o con responsabilidades como hijos o matrimonios enfocadas en el progreso y otras jóvenes sin responsabilidades enfocadas mayoritariamente en pasarla bien y recibir el sustento del día a día. También se establece que aún con la prioridad de llevar un estilo de vida de ocio y compañerismo, el factor dinero no deja de ser importante para los domiciliarios, es la primera condición para ellos en la toma de decisión de abandonar un clúster aún si en este se encuentren sus amigos.

Todas estas variables fueron tenidas en cuenta en la construcción del modelo ignorando el tiempo que cada domiciliario dedica a su trabajo, obteniendo por medio de la simulación de este modelo resultados que logran aproximar la representación de la realidad con un índice de confianza del 95 % calculado a partir de la información obtenida de las encuestas realizadas.

REFERENCIAS

- [1] D. M. Abisambra Suárez and M. Marulanda Cardona, "Predictive modeling for an effective resource allocation : foreseeing Rappi courier shortage for the sake of improving service quality," instname:Universidad de los Andes, 2019, Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/44660>
- [2] A. M. Quintero Ossa, "Two-Stage Analytics Framework for Warehouse Location for Rappi: A Case Study in Ciudad de Mexico (Mexico)," 2020, Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1992/50594>
- [3] C. E. T. Torres, "Inteligencia colectiva: enfoque para el análisis de redes," Estudios Gerenciales, vol. 30, no. 132, pp. 259–266, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.ESTGER.2014.01.014.
- [4] L. Alvarez-Pomar, "Modelo de inteligencia colectiva de los sistemas peatonales. ," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2016.
- [5] C. R. Smith, A. L. Toth, A. V Suarez, and G. E. Robinson, "Genetic and genomic analyses of the division of labour in insect societies," Nat Rev Genet, vol. 9, no. 10, pp. 735–748, 2008, doi: 10.1038/nrg2429.
- [6] S. Alag, Collective Intelligence in Action. Manning, 2008. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.manning.com/books/collective-intelligence-in-action>
- [7] A. W. Woolley, C. F. Chabris, A. Pentland, N. Hashmi, and T. W. Malone, "Evidence for a Collective Intelligence Factor in the Performance of Human Groups," Science (1979), vol. 330, no. 6004, pp. 686–688, 2010, doi: 10.1126/science.1193147.
- [8] P. Levy, Inteligencia Colectiva. 2004. [Online]. Available: <http://www.textos.pucp.edu.pe/textos/descargar/2281.pdf>
- [9] T. Malone, T. Atlee, P. Lévy, T. Rt, H. Paul, and T. Homer-dixon, Collective Intelligence: Creating a Prosperous World at Peace. Oakton, Virginia, 2008.
- [10] E. Astigarraga, J. Azpillaga, L. Fernández, and A. Naberan, "Umap, inteligencia colectiva extraída de las redes sociales," El Profesional de la Informacion, vol. 20, Oct. 2011, doi: 10.3145/epi.2011.sep.08.
- [11] S. Hassan, M. Guijarro, and L. Garmendia, "Aplicación de lógica borrosa a sistemas sociales con agentes software," in Primer Congreso Internacional de Matemáticas en Ingeniería y Arquitectura, 2019. Accessed: Oct. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Maria-Guijarro-3/publication/268401769_Aplicacion_de_logica_borrosa_a_sistemas_sociales_con_agentes_software/links/56cf107108aeb52500c92e33/Aplicacion-de-logica-borrosa-a-sistemas-sociales-con-agentes-software.pdf

Modelo predictivo de la interacción Humano Estructura vertical en puentes peatonales

Juan Aux¹, Bryan Castillo² y Peter Thomson³

Abstract—Debido al uso de materiales livianos y de alta resistencia muchos puentes peatonales modernos tienden a ser flexibles y susceptibles a vibraciones, causando molestias a los peatones y afectando las condiciones de servicio. Aunque la biomecánica de marcha ha sido ampliamente estudiada y se han sido utilizados previamente técnicas de optimización para la predicción de la marcha en superficie rígida, hay pocos estudios sobre el efecto de interacción humanos-estructura en el paso de peatones sobre estructuras flexibles. En este trabajo, se utilizó una combinación de dinámica inversa y técnicas de optimización para predecir la marcha humana en una estructura flexible en el plano sagital. La marcha es formulada como una tarea motriz óptima sujeta a múltiples restricciones, siendo el criterio de desempeño la minimización del gasto de energía mecánica durante un ciclo completo de marcha. Movimientos segmentarios, las fuerzas aplicadas por el peatón y la vibración del puente, fueron predichas a partir de parámetros que describen la marcha (velocidad de marcha, frecuencia de marcha y duración de doble apoyo) y parámetros físicos y dinámicos que describen el puente peatonal (frecuencia natural, coeficiente de amortiguamiento y longitud del puente).

Index Terms—Interacción Humano Estructura, Modelo Biomecánico, Vibraciones, Puentes Peadonales, Optimización, Dinámica Inversa.

I. INTRODUCCIÓN

La principal fuente de excitación de los puentes peatonales corresponde a las fuerzas inducidas por el tránsito de las personas que los ocupan. Sin embargo, ante el creciente avance de la mecánica de materiales, ligado a las tendencias constructivas actuales, los diseños arquitectónicos se han enfocado en el desarrollo de estructuras livianas y esbeltas haciendo uso de grandes luces entre puntos de apoyo [1]. Estas características físicas provocan que sus propiedades dinámicas, en especial las frecuencias modales, presenten valores inferiores a 10 Hz, haciendo evidente su alta susceptibilidad ante cargas dinámicas en este rango de frecuencia [2], [3].

Se han desarrollado normativas que rigen el diseño de este tipo de estructuras [4], [5], [6], [7], [8], [9], pero la Interacción Humano Estructura (IHE) no se considera completamente. Mayormente, estas normativas solo sugieren un valor de frecuencia modal mínima y una evaluación mediante un modelo de fuerza de reacción de suelo (GRF) móvil [10], lo que podría llevar a una subestimación de las vibraciones producidas por la actividad humana [11], generando posibles costos adicionales de rehabilitación y mantenimiento.

Se han propuesto diversos modelos para simular los efectos de la IHE. El modelo más sencillo describe la marcha humana como una GRF equivalente, variable en tiempo, representada por una serie de Fourier [12], [13], [14], [15]. Sin embargo, este modelo no considera la IHE, ya que se ignora el efecto del cuerpo humano en las propiedades dinámicas estructurales (H2SI) y la influencia de las vibraciones estructurales en las cargas antrópicas (S2HI) [16], [17].

Se han desarrollado modelos biomecánicos de marcha que consideran características antropométricas basados en técnicas de optimización [18], [19]. Aunque tienen ventajas, son computacionalmente costosos. Por ello, el método de dinámica inversa se ha convertido en una alternativa atractiva [18], [19], [20], ya que no requiere la solución de ecuaciones diferenciales.

En esta investigación se propone un modelo de IHE acoplado que involucre la dinámica de los sistemas humano y estructura. Dicho modelo se basa en el principio que los procesos naturales utilizan la mínima energía posible para ejecutarse [21], [18]. Por lo cual, se propone como función objetivo la energía mecánica requerida para atravesar un puente peatonal. Adicionalmente, incluye un conjunto de restricciones cinemáticas, cinéticas y de avance, que le permiten predecir la marcha humana.

II. METODOLOGÍA

En el modelo de IHE implementado en esta investigación se combina la representación de la marcha humana en el plano sagital, propuesta por [18], y la descripción analítica de un puente peatonal, Figura 1.

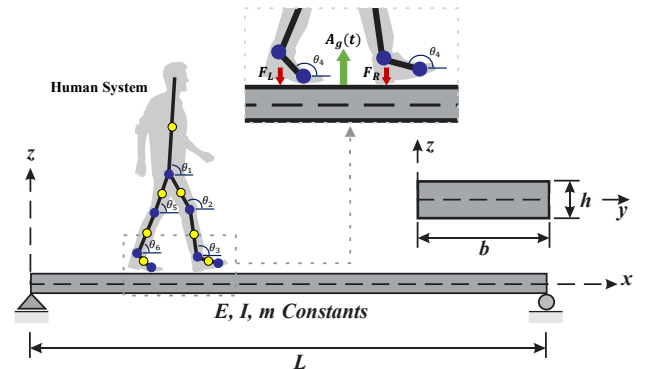


Fig. 1. Modelo acoplado de Interacción Humano-Estructura

¹ Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Estudiante Ms.C., Cali, Colombia;

² Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Estudiante Ph.D, Cali, Colombia;

³ Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Profesor Titular, Cali, Colombia

A. Sistema Humano

El movimiento del cuerpo humano es representado a través de un modelo de 7 elementos rígidos conectados por articulaciones (Segmentos Corporales), propuesto por [18], enfocado en el plano sagital. Debido a la periodicidad de los movimientos del cuerpo humano, la cinemática de dicho modelo es descrita a partir de una serie de ecuaciones, en función del desplazamiento angular de cada elemento, el cual, es representado mediante una serie de Fourier de quinto orden, Eq. (1).

$$\theta_i = a_o + \sum_{n=1}^5 \left[a_n^{(i)} \cos(n\omega_c t) + b_n^{(i)} \sin(n\omega_c t) \right] \quad (1)$$

El modelo de siete elementos fue utilizado en un proceso de minimización, en el que la función objetivo corresponde a la energía mecánica de la marcha humana. Esta energía se expresa como la integral de la potencia sobre el tiempo que tarda una persona en cruzar la estructura, Ec. (2). Donde T_i es el torque neto del nodo i y ω es la velocidad angular de cada una de las articulaciones en el punto proximal y distal.

$$E_m = \int_0^{T_c} \sum_{i=1}^7 |T_i(\omega_p - \omega_d)| dt. \quad (2)$$

A partir de los movimientos de cada segmento corporal, se utilizó la metodología de dinámica inversa para determinar la cinética conjunta del sistema humano, utilizando las expresiones formuladas por [18], Eq.(3), la cual, fue usada para calcular las fuerzas de reacción, para finalmente cuantificar la energía mecánica empleada durante el transito sobre la estructura.

$$\sum \vec{F}_i = \sum_{i=1}^7 m_i (\vec{a}_i - \vec{g} + \vec{a}_g(t)) \quad (3)$$

La Eq.(3), fue modificada con el fin de incluir la acción de las vibraciones generadas en la estructura $\vec{A}_g(t)$ debido a la retroalimentación de las cargas antrópicas, acoplando así, la cinética conjunta de IHE.

B. Sistema estructural

La estructura flexible propuesta para realizar la simulación de IHE, consiste de una viga simplemente apoyada con sección prismática de hormigón de peso normal. Las propiedades mecánicas y dinámicas de la estructura se presentan en la Tabla I. Las frecuencias para cada modo de vibración vertical se calculan utilizando la Ec. (4). Esto representa las condiciones de una estructura flexible susceptible a cargas dinámicas, con una frecuencia fundamental cercana a la frecuencia de marcha del peatón.

$$f_n = (\pi \hat{n})^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad (4)$$

Donde, E, I, L y $\bar{m}$ representan el modulo de elasticidad del concreto, la inercia de la sección, la longitud y la masa por unidad de longitud de la estructura. La Ec. (5) es una ecuación

TABLA I
PROPIEDADES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

Propiedades Mecánicas					Propiedades Dinámicas			
b (m)	h (m)	L (m)	$\bar{m}$ (Kg/m ³)	f_c' (MPa)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	ζ (%)
2	0.031	12	2300	28	2.017	8.076	18.152	5

diferencial parcial (EDP) de cuarto orden que describe la deflexión de cualquier punto situado en el eje x de la viga en un instante dado. Aquí, $p(x, t)$ representa la carga generada por la persona que camina sobre la estructura. La EDP se solucionó utilizando el método de separación de variables, Eq. (6).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \right] + m(x) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + c(x) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = p(x, t) \quad (5)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) Y_n(t) \quad (6)$$

Partiendo de las ecuaciones que describen la cinemática y cinética de la marcha humana, los sistemas dinámicos humano y estructura fueron acoplados tomando del sistema humano, la fuerza inducida por la marcha en función del tiempo Eq. (3) y la posición de la persona (x_R, x_L), Eq. (7).

La Eq. (8), representa las aceleraciones en el punto de contacto inducidas por la estructura debido a la marcha humana. Reemplazando la Eq. (7) en (5), se obtiene la ecuación en coordenadas modales para solucionar el modelo de IHE, Eq. (9). Donde $F_L(t) = (1 - D(t)) \sum_{i=1}^7 m_i (a_i(t) - g)$ y $F_R(t) = D(t) \sum_{i=1}^7 m_i (a_i(t) - g)$ corresponden fuerzas de los pies izquierdo y derecho, respectivamente, inducidas por la marcha sin influencia de las aceleraciones producidas por la estructura. $D(t)$ representa la función de transferencia de fuerzas entre los pies izquierdo y derecho durante la fase de apoyo doble y $m_p = \sum_{i=1}^7 m_i$, representa la masa total del sistema humano.

C. Optimización

Se utilizó el algoritmo de optimización interior-point con la función fmincon del lenguaje Matlab en un ordenador con las siguientes características: sistema operativo Windows 11 Pro de 64 bits, procesador AMD Ryzen 3900X @3.97 GHz y memoria RAM 32.0 GB.

La optimización está orientada a predecir la cinemática angular de cada segmento corporal, mediante un conjunto de coeficientes de una serie de Fourier de orden cinco, Eq. (1), con el objetivo de reducir la energía mecánica durante del sistema humano durante su transito a través de la estructura, descrita en la Eq. (2) y sujeto a las restricciones presentadas en la Table II. Dichas restricciones establecen que las articulaciones simuladas no deben superar los valores de movimiento angular mínimos y máximos, para evitar hiperextensiones; las fuerzas de contacto verticales, en los pies, deben ser positivas y

$$p(x, t) = \left[(1 - D(t)) \sum_{i=1}^7 m_i (a_i(t) - g + a_g(t)) \right] \delta(x - x_L(t)) + \left[D(t) \sum_{i=1}^7 m_i (a_i(t) - g + a_g(t)) \right] \delta(x - x_R(t)) \quad (7)$$

$$a_g(t) = \sum_{n=1}^3 \left[(1 - D(t)) \sin\left(\frac{\hat{n}\pi x_L(t)}{L}\right) + D(t) \sin\left(\frac{\hat{n}\pi x_R(t)}{L}\right) \right] \ddot{Y}_n(t) \quad (8)$$

$$\ddot{Y}_{\hat{n}}(t) + \frac{m_p}{M_{\hat{n}}} S_{\hat{n}}(t) \left[\sum_{m=1}^3 S_m(t) \ddot{Y}_{\hat{n}}(t) \right] + 2\zeta_{\hat{n}} \omega_{\hat{n}} \dot{Y}_{\hat{n}}(t) + \omega_{\hat{n}}^2 Y_{\hat{n}}(t) = -\frac{1}{M_{\hat{n}}} \left[F_L(t) \sin\left(\frac{\hat{n}\pi x_L(t)}{L}\right) + F_R(t) \sin\left(\frac{\hat{n}\pi x_R(t)}{L}\right) \right] \quad (9)$$

TABLA II
RESTRICCIONES PARA SIMULACIÓN .ADAPTADO DE [18]

Función de Costo	26em <i>Mimimizar</i> E_m Eq.(2)
Restricción	
21em1	Movimientos máximos de los elementos $0 \leq \theta_i(t) \leq \pi, t \in [0, T_c] (i = 1, 2, \dots, 13).$
31em2	Giro relativo de los brazos $\theta_{min}^{(1)} \leq \theta_2(t) - \theta_3(t) \leq \theta_{max}^{(1)},$ $\theta_{min}^{(2)} \leq \theta_4(t) - \theta_3(t) \leq \theta_{max}^{(2)}, t \in [0, T_c].$
31em3	Giro relativo de las rodillas $\theta_{min}^{(1)} \leq \theta_2(t) - \theta_3(t) \leq \theta_{max}^{(1)},$ $\theta_{min}^{(2)} \leq \theta_4(t) - \theta_3(t) \leq \theta_{max}^{(2)}, t \in [0, T_c].$
31em4	Contacto de los pies $y_{tip}(t) > 0$ en fase de balanceo y $y_{tip}(t) = 0$, cuando esta apoyado
31em5	Cinéticas $F_y > 0$ y $\mu < \left(\left[\frac{F_x}{F_y}, \frac{F_z}{F_y} \right] \right) < \mu.$ Cuando exista contacto con el suelo.
21em6	Longitud de paso $x_{an}(T_c) - x_{an}(0) = V_a T_c.$

las componentes horizontales deben cumplir con el coeficiente de fricción; durante el ciclo de marcha se debe mantener por lo menos un pie en contacto con la estructura. En el proceso de optimización se definieron parámetros iniciales de marcha como son: velocidad promedio de caminata, frecuencia de caminata, y duración de apoyo doble.

III. RESULTADOS

Se realizó una simulación de IHE para un sujeto de prueba de 80 Kg transitando a lo largo de la estructura de referencia con una frecuencia de marcha $f_c = 2Hz$, a una longitud de paso de 1.5 m y duración de apoyo doble entre el 33 y 50 % para cada ciclo de marcha. El tiempo de procesamiento para la simulación fue aproximadamente 2 minutos, con un total de 162 iteraciones, resultando en un valor mínimo de $E_m = 201J$ para la función de costo. Los coeficientes óptimos de la serie de Fourier, que describen la variación de los ángulos absolutos de cada segmento corporal durante los ciclos de marcha considerando efecto de IHE, se presentan en la Tabla III. Estos coeficientes permiten una representación precisa y realista de la cinemática del cuerpo humano en respuesta a las vibraciones de la estructura ($A_g(t)$).

Se realizaron comparaciones para las fuerzas verticales, con y sin considerar los efectos de la IHE. En la Fig. 2 se muestra la fuerza vertical en función del tiempo a lo

TABLA III
COEFICIENTES DE LA SERIE DE FOURIER

2*Elemento	i	θ_i					
		0	1	2	3	4	5
2*HAT	a_n	1.51	54.04	-42.89	2.67	-3.54	1.44
	b_n		-20.34	-12.10	5.87	23.93	0.70
2*Muslo	a_n	1.81	156.86	-83.14	17.14	15.10	10.52
	b_n		-139.29	-20.91	-16.06	-0.69	6.73
2*Pantorrilla	a_n	1.31	453.10	-92.95	-9.66	14.76	-6.54
	b_n		-307.10	-36.66	75.73	-14.44	-12.49
2*Pie	a_n	2.38	614.96	-261.64	39.60	-12.79	0.69
	b_n		-386.47	-102.11	138.16	-35.60	5.69

largo del puente peatonal, destacando el ciclo de la marcha cerca del vano central, donde se observa la influencia de la IHE sobre las GRFs con una diferencia del 10%. Estos cambios son significativos, con un aumento de magnitud de aproximadamente 30 N, lo que demuestra los efectos de la IHE en el sistema humano. Esto puede atribuirse principalmente a la flexibilidad de la estructura y a su coincidencia de frecuencia con la frecuencia de la marcha.

La aceleración en el punto de contacto ($A_g(t)$) durante la IHE se muestra en la Figura 3. Se registraron niveles de aceleración de 5 m/s², con un pico de 5,358 m/s². Estas aceleraciones son lo suficientemente significativas como para alterar considerablemente el patrón de marcha y, en consecuencia, dar lugar a un aumento significativo de las fuerzas verticales del sistema humano y de la respuesta de la estructura. Este patrón se repite hasta que el peatón cruza la estructura.

Finalmente, las Figuras 3(a) a 3(d) muestran la respuesta global del sistema estructural sometido a cargas antrópicas considerando los efectos de la IHE. Las Figs. 3.b y 3.d muestran los desplazamientos y aceleraciones en el centro de la luz, alcanzando un máximo de 0,059 m y 5,352 m/s², respectivamente, destacando la amplificación en la respuesta dinámica de la estructura debido a su resonancia con las cargas antrópicas. Estos resultados validan la capacidad de los modelos desarrollados para representar la IHE.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló un modelo predictivo de la IHE vertical para puentes peatonales, que consiste en un modelo biomecánico simplificado de la marcha humana con 7 elementos rígidos y un sistema estructural representado por una viga simplemente apoyada. El objetivo principal de este modelo fue

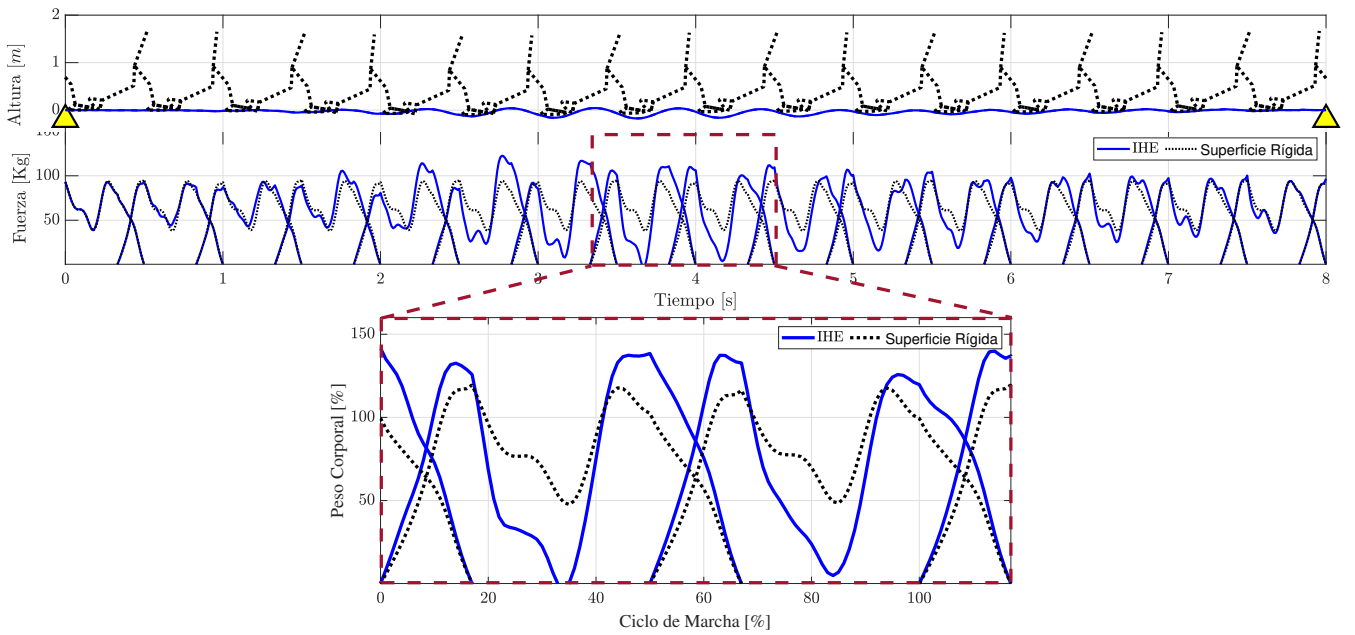


Fig. 2. Fuerzas de reacción vertical durante la caminata sobre superficie rígida y considerando efectos de IHE.

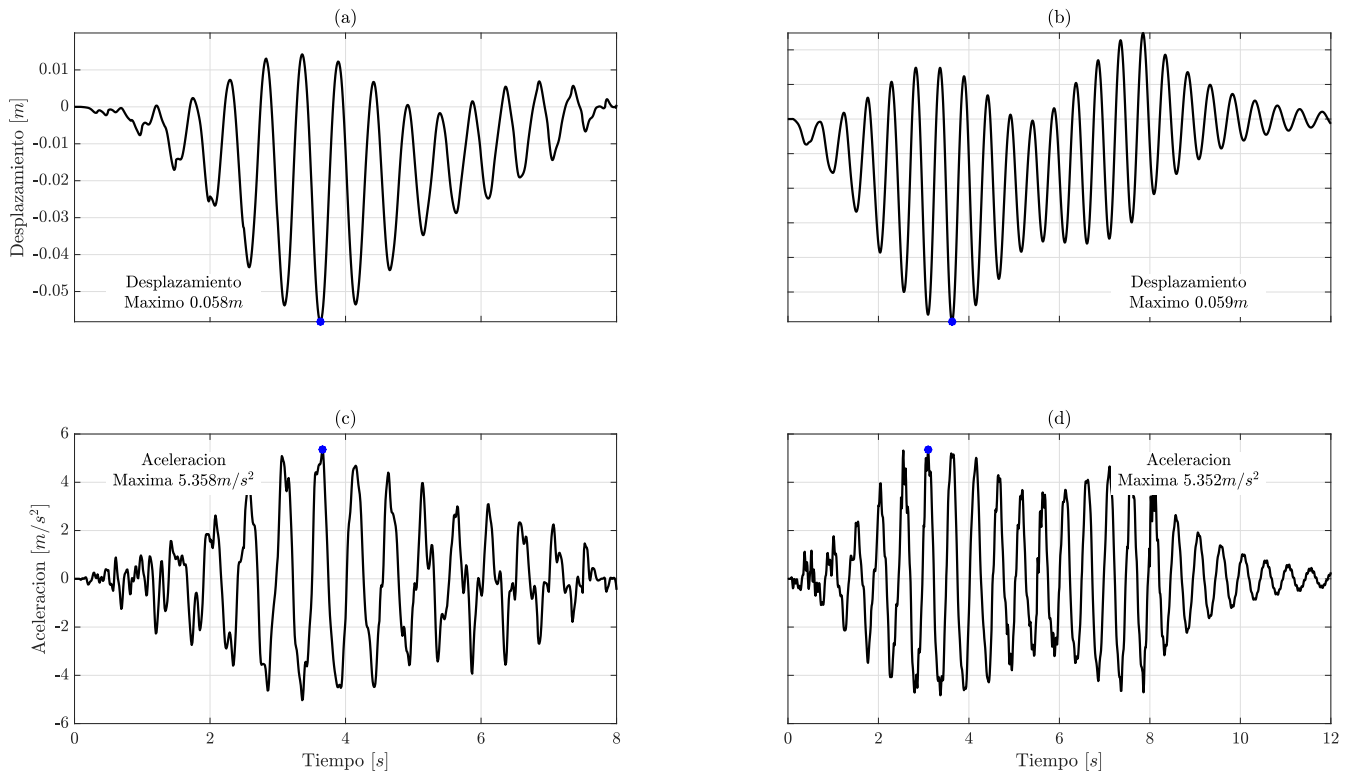


Fig. 3. Respuesta dinámica del sistema estructural. a) Desplazamiento en el punto de contacto $D_g(t)$, b) Desplazamiento en el centro de la luz, c) Aceleración en el punto de contacto $A_g(t)$, d) Aceleración en el centro de la luz.

minimizar la energía mecánica media necesaria para que un ciclo de la marcha cruzara un puente peatonal, mediante el empleo de una combinación de dinámica inversa para calcular la cinemática y la cinética de la marcha humana, y de dinámica directa para resolver las ecuaciones diferenciales que rigen la respuesta estructural bajo cargas antrópicas, representando

eficazmente los efectos de la IHE.

El movimiento de los segmentos corporales y las fuerzas de reacción del suelo fueron estimados mediante tres características definidas de la marcha: velocidad media, frecuencia y longitud de paso. Además, ningún movimiento fue sobreimpuesto, lo que permite obtener movimientos corporales

naturales, solo limitándolos a hiperextensiones físicamente irreales. Por otro lado, la energía mínima encontrada en este modelo es menor respecto a la de [18], suponemos, debido a la inclusión de los segmentos corporales superiores en este modelo, la tridimensionalidad del mismo y los efectos de IHE.

El uso de dinámica inversa, en contraste con la directa, tiene varias ventajas, entre ellas su eficiencia computacional, crucial para los modelos predictivos basados en técnicas de optimización. Se encontró que el mayor costo computacional se presentaba en el momento de la solución de las ecuaciones diferenciales del sistema estructural. Sin embargo, la combinación de dinámica directa e inversa es una alternativa importante para los modelos de IHE ya que el tiempo de ejecución para cada iteración de optimización se reduce considerablemente.

El modelo presentado tiene la capacidad de simular adecuadamente la cinética y cinemática de la marcha humana, y paralelamente, la respuesta dinámica de estructuras bajo efectos de IHE. Aunque la fuerza vertical Fig. 2, tiene una diferencia en la cantidad de picos que se han reportados en la literatura, esta condición se observa comúnmente en modelos con alta rigidez de los segmentos corporales a bajas velocidades de marcha, donde se genera un mayor número de picos de fuerza a medida que disminuye la velocidad de marcha [22].

Los resultados de las simulaciones de IHE muestran que este tipo de modelos, tienen el potencial para representar algunos de los efectos de la IHE en puentes peatonales, por lo que se configuran como una alternativa viable para la evaluación de los efectos de la IHE.

Los resultados de la simulación de la IHE demuestran el potencial de este enfoque de modelización para representar los efectos de la IHE en puentes peatonales, lo que lo convierte en una herramienta viable para evaluar y comprender el impacto de la IHE.

REFERENCES

- [1] S. Živanović, A. Pavić, and P. Reynolds, "Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, pp. 1–74, 1 2005.
- [2] J. A. Sánchez, D. Gómez, and P. Thomson, "Analysis of human-structure interaction in footbridges in santiago de cali," *DYNA (Colombia)*, vol. 80, pp. 86–94, 2 2013.
- [3] A. R. Ortiz, D. Gómez, and P. Thomson, "Efectos de la interacción humano-estructura en las propiedades dinámicas de una tribuna," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, pp. 63–73, 6 2012.
- [4] T. M. Murray, E. E. Ungar, and D. B. Davis, *Vibrations of Steel-Framed Structural Systems due to Human Activity*, 2nd ed., A. I. of Steel Construction, Ed. AISC, 2016.
- [5] Eurocode-5, *Design of timber structures - Part 2: Bridges*, E. 1995-2:2004, Ed. European Committee of Standardization, 2004.
- [6] ISO-10137, *Bases for design of structures-Serviceability of buildings and walkways against vibrations*. International Organization for Standardization (ISO), 2007.
- [7] B. S. I. (BSI), *UK national annex to Eurocode 1: Actions on structures-Part 2: Traffic loads on bridges*, N. to BS EN 1991-2:2003, Ed. European Committee of Standardization, 2003.
- [8] A. C. I. Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ACIS), 1 2010.
- [9] SETRA, *Footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. French association of civil engineering (SETRA), 2006.
- [10] E. Shahabpoor, A. Pavić, and V. Racić, "Interaction between walking humans and structures in vertical direction: A literature review," *Shock and Vibration*, vol. 2016, 2016.
- [11] S. Živanović, A. Pavić, and E. T. Ingólfsson, "Modeling spatially unrestricted pedestrian traffic on footbridges," *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, pp. 1296–1308, 2010.
- [12] E. Ahmadi, C. Caprani, S. Živanović, and A. Heidarpour, "Vertical ground reaction forces on rigid and vibrating surfaces for vibration serviceability assessment of structures," *Engineering Structures*, vol. 172, pp. 723–738, 10 2018.
- [13] C. C. Caprani and E. Ahmadi, "Formulation of human-structure interaction system models for vertical vibration," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 377, pp. 346–367, 9 2016.
- [14] S. C. Kerr and N. W. M. Bishop, "Human induced loading on flexible staircases," *Engineering Structures*, vol. 23, pp. 37–45, 1 2001.
- [15] H. Bachmann, W. J. Ammann, F. Delschl, J. Eisenmann, I. Floegl, G. H. Hirsch, G. K. Klein, G. J. Lande, O. Mahrenholtz, H. G. Natke, H. Nussbaumer, A. J. Prftlove, J. H. Rainer, E.-U. S. Lorenz, S. Birkhauser, V. Bash-, and B. Berlin, *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines. Appendix G*. birkhauser verlag, 1995.
- [16] B. Lin, Q. Zhang, F. Fan, and S. Shen, "Reproducing vertical human walking loads on rigid level surfaces with a damped bipedal inverted pendulum," *Structures*, vol. 33, pp. 1789–1801, 10 2021.
- [17] Z. Han and S. Huang, "The influence of human-structure interaction on structural dynamic properties," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 787, 6 2021.
- [18] L. Ren, R. K. Jones, and D. Howard, "Predictive modelling of human walking over a complete gait cycle," *Journal of Biomechanics*, vol. 40, pp. 1567–1574, 2007.
- [19] Y. Xiang, J. S. Arora, and K. Abdel-Malek, "Physics-based modeling and simulation of human walking: A review of optimization-based and other approaches," *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 42, pp. 1–23, 7 2010.
- [20] H. Salehi, L. Ren, and D. Howard, "A fast inverse dynamics model of walking for use in optimisation studies," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 19, pp. 1201–1209, 8 2016.
- [21] D. A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 9 2009.
- [22] H. Geyer, A. Seyfarth, and R. Blickhan, "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running," *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 273, pp. 2861–2867, 11 2006.

Study of Robotic Hand Projects and Development of Low-Cost Prototype

1st Gabriel Barbosa Pinheiro
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

2nd Luana Stefany Moura dos Santos
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

3rd Rafael Oliveira Campelo
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

4th Rejane Cavalcante Sá Rodrigues
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

5th Júlia Ferreira Alves
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

6th João Pedro Sales Ximenes
Instituto Federal do Ceará
Fortaleza, Brazil

Abstract—This work involves studying robotic hand and arm projects already implemented in academia and industry. It also entails the creation of our own project based on the study, incorporation, modification, and improvement of existing projects in the field. This initiative arose from the recognition of the need for prostheses that can be accessible to individuals who cannot afford mechanically moving prostheses, as these products are typically expensive. The project was initiated with the goal of understanding the challenges in the field and facilitating the future development of a product that can benefit both the academic and medical communities. The aim is to make the project easily reproducible after its completion. From the outset of the project, it became apparent that its full execution would require a comprehensive case study before planning and initiation. We have studied real prostheses, such as those developed by Open Bionics.

Index Terms—Robotic Hand, Modeling, 3D Printing, Prototyping.

I. INTRODUCTION

THIS project aims to investigate devices in the field of mechanical prosthetics, with a focus on assisting individuals with limb amputations, particularly in the hands and arms. Additionally, the goal is to conceive and develop functional prototypes based on the research conducted by ALVE and HUSSEIN [1], [2]. Upon analyzing references from similar projects, it was found that many of them lack easily comprehensible methodologies, as they are often geared towards more technical audiences, which can hinder understanding by lay audiences. Furthermore, it was observed that the available modeling repositories lack innovation. Often, they present very similar projects with few or no novel features. Therefore, several virtual modeling experiments were conducted to evaluate the efficiency of each one through 3D printing, using an Ender 3 S1 PRO printer for manufacturing the parts.

Through this project, our aim is to contribute to the scientific community by presenting our unique perspective on the subject. This will involve creating original models and modifying existing public ones, ultimately fostering the development of comprehensive knowledge and the exchange of ideas. To accomplish this work, we performed a process

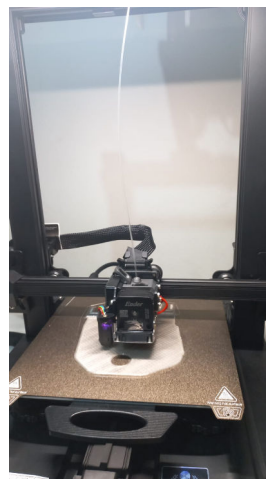


Fig. 1: Initial prototype printing.

of model evolution, which allowed us to gain a broad understanding of the possibilities and challenges inherent in the field, including those related to the choice of materials. Given our goal of cost-effectiveness, it is impractical to use expensive materials. Therefore, we have opted to print components using PLA filament through 3D printing, making it the ideal choice.

II. METHODOLOGY

For this project, we adopted a methodological approach focused on studying projects related to mechanical prosthetics and orthotics for the upper limbs, specifically the arms and hands.

The primary objective is to understand the development of such projects in order to create a low-cost and easily replicable version. Thus, the project was carried out in four distinct stages: analysis of previously conducted case studies, computational prototyping of alternatives, evaluation of the developed prototypes, and implementation of improvements. During the development of the case studies, we examined projects of various natures in the field of robotic hand and arm prototyping. This allowed us to gain knowledge

and different perspectives on the challenges faced in each situation and identify the best alternative for our project proposal. We found various approaches to connecting finger movement to selected motors. Some projects used artificial tendons to establish the connection between the fingers and motors, as exemplified in the models developed by ALVES and HUSSEIN [1], [2]. Initially, our models were designed virtually following this methodology. However, we observed that this solution is more commonly used in models that do not involve wrist and forearm articulation, as these movements could limit the finger's range of motion. Therefore, we opted for a modeling approach that enables full mechanical transmission of motion to the fingers, allowing free wrist movement, as seen in various models available online (such as the model that served as the basis for the present project, available at: grabcad.com¹).

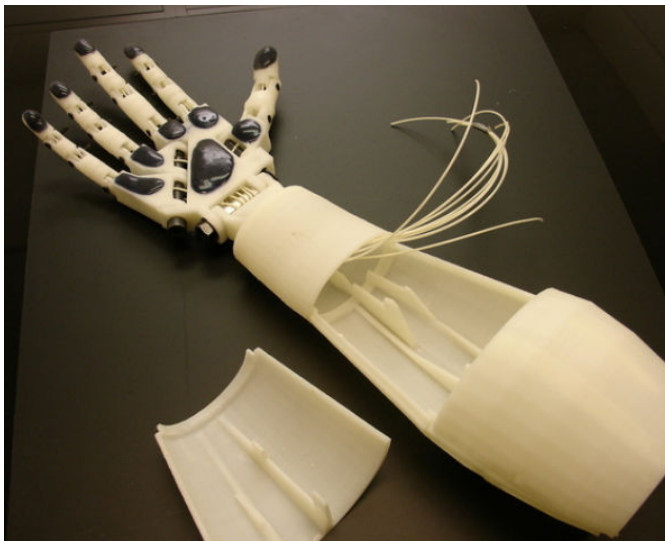


Fig. 2: Example model.

Source: <https://www.thingiverse.com/thing:17773>.

In terms of computational prototyping, we initially opted for Solid Edge software due to its availability of a free student license. However, we later decided to switch to Fusion 360 software, also with a free license. This choice was driven by Fusion 360's capacity to facilitate professional object manipulation, creation, and file sharing, which are particularly advantageous for a project intended for the scientific community. In the initial phase of the project, we developed original prototypes using the tools available in Solid Edge, which yielded satisfactory results. However, these prototypes lacked additional features and a closer resemblance to a human model. After gaining experience with the initial versions, we used an online model to create a new version, adapting the modeling we had obtained and incorporating components from

¹<https://grabcad.com/library/robotic-hands-animation-with-five-servo-sg90-eyeglasses-1>

the previous version. These improvements allowed for 3D printing of the project. By developing more than three distinct virtual models, we created a prototype that could be printed and assembled, enabling a real-world study of the device. Additionally, based on the study presented by HUSSEIN [2], we gained a comprehensive understanding of the degrees of freedom in a human hand, providing insight into achieving smoother movements through motion transmission.

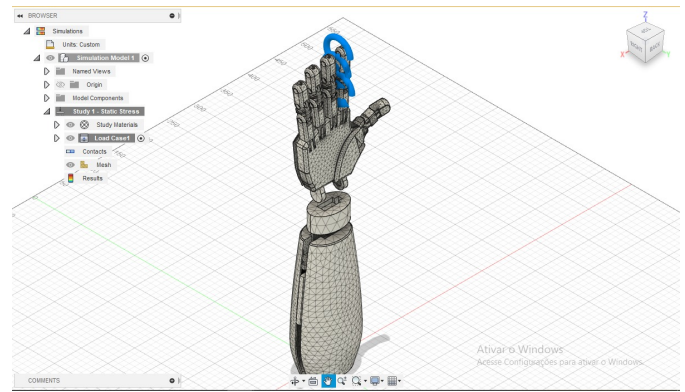


Fig. 3: Solid Edge model.

During the evaluation of the developed prototypes, it was found that the work is functional and provides the groundwork for various future improvements. It serves as a fundamental structure for mechanical alterations and additions.

Moreover, through the different modeling iterations, we developed fundamental concepts related to mechanical motion processes, enabling a revision of these concepts and their application in future adaptations. By studying the works of ALVES and the model developed by HUSSEIN [1], [2], we established a solid theoretical foundation. This foundation facilitated the creation of appropriate modeling, utilizing modifications of the model presented by Luca Delbarba in the GrabCAD repository. These references provided valuable insights into the development of robotic hands, allowing for the application of theoretical knowledge and practical enhancements. Thus, the work established a strong theoretical foundation and contributed to the creation of consistent modeling, paving the way for future advancements in the field.

Regarding improvements, alternative solutions already exist and will be tested to address certain project inconsistencies, such as the use of carbon fiber filament in printing. This approach would provide greater mechanical strength than using PLA, while still resulting in lightweight and low-density components. Additionally, the promotion of actuators that serve as a feedback system should be considered in case the project is adapted for mechanical prostheses, as the lack of feedback is the main complaint from users of such equipment. Furthermore, we are currently studying new sources, such as the work presented by TIAN [3] and also the one written by SHORTHORSE [4]. These works present distinct methodologies for project execution, offering greater possibilities and more

coherent implementations aligned with current demands.

III. RESULTS

After completing the first cycle of the project, the need for improvements in both modeling and the integration of other project components became evident. These improvements range from the positioning of actuators, such as servo motors, to the evaluation of alternatives for their selection.

As an initial result, a functional prototype that meets the established limitations was obtained. This prototype provides an initial glimpse of the final project to be achieved and indicates the next steps to be followed. It's important to emphasize that if the need arises to adopt approaches different from those already established, significant changes can be made to the project structure. These changes may encompass various factors, from modeling to the choice of materials.

The project is continuously evolving, and the feedback obtained through this first phase provides valuable insights to enhance the project toward its final objectives. It's worth mentioning that all software used (Fusion 360 and Solid Edge) were utilized through their respective educational licenses.

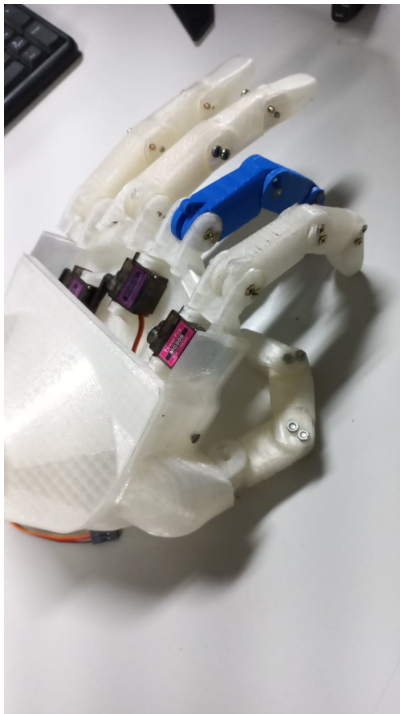


Fig. 4: Validated prototype.

IV. CONCLUSIONS

Thus, it is clear that the project has been successful from an educational perspective. Developing more than three distinct versions has significantly advanced our knowledge in modeling and 3D printing. It has also helped us structure knowledge in the field of mechanical prosthetics and orthotics.

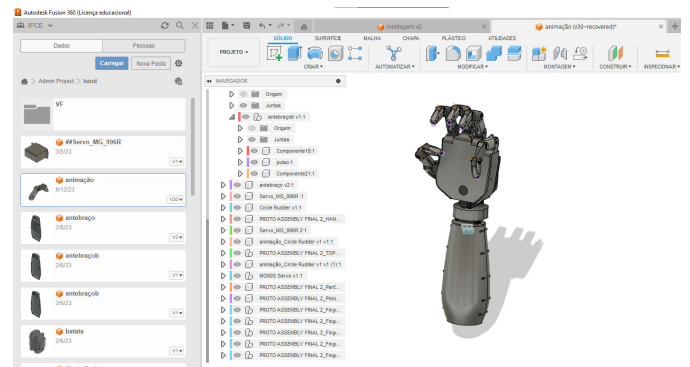


Fig. 5: Current Fusion 360 model.



Fig. 6: Rendering of the current Fusion 360 model.

As mentioned earlier, we gained fundamental knowledge covering various aspects of mechanical prosthetics. This provided us with an initial understanding of the challenges in this field, from designing lighter and more ergonomic projects to incorporating actuators that provide user feedback, as demonstrated in SHORTHOSE's work [4], with the aim of enhancing user autonomy and comfort.

Therefore, the work accomplished serves as a solid foundation for future advancements in this field, setting the stage for the development of more complex and efficient projects.

Looking ahead, the knowledge and experience gained from this project will serve as a launchpad for our continued exploration of innovative solutions in mechanical prosthetics and orthotics. We envision leveraging this foundation to push the boundaries of design, materials, and

functionality, aiming to create prosthetic devices that are not only technologically advanced but also more affordable and accessible. Our commitment to this field extends beyond this project, and we anticipate collaborating with experts, researchers, and organizations to drive further advancements, with the ultimate goal of improving the lives of individuals who rely on prosthetic devices.

ACKNOWLEDGMENTS

We extend our heartfelt gratitude to IFCE (Federal Institute of Ceará), the LIT Laboratory (Technological Innovation Laboratory), the NEPEN Foundation, and the Iracema Institute for their invaluable infrastructure and financial support. Their contributions have been integral to the success and progress of our work.

REFERENCES

- [1] ALVES, Frederyk Antunnes de Sousa. Prototype of robotic wrist and hand prosthesis using arduino. 2018. Completion of course work. Brazil.
- [2] HUSSEIN, Mahdi Elsayed; BROOKER, G. 3D printed myoelectric prosthetic arm. Engineering (Mechatronics) Thesis October, 2014.
- [3] TIAN, Li et al. The making of a 3D-printed, cable-driven, single-model, lightweight humanoid robotic hand. *Frontiers in Robotics and AI*, v. 4, p. 65, 2017.
- [4] SHORTHOSE, Oliver et al. Design of a 3D-printed soft robotic hand with integrated distributed tactile sensing. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 7, n. 2, p. 3945-3952, 2022.

Aplicación Multi-experimental de una SHTR para el Desempeño Sísmico de una Edificación de Muros Delgados de Concreto Reforzado con Aislamiento en la Base

Alejandro Artunduaga, Bryan Castillo, Peter Thomson y Johannio Marulanda
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen—Debido al constante uso de Muros Delgados de Concreto Reforzado en el Sistema Industrializado para la construcción de vivienda VIS se generó cierta preocupación debido al reducido desempeño de estos elementos al momento de ser expuestos a demandas sísmicas altas. Debido a las limitaciones del comportamiento dinámico y a las condiciones de riesgo sísmico en el territorio colombiano es necesario la implementación de mecanismos de control encargados de reducir la vulnerabilidad de este tipo de estructuras. Aunque se han realizado diversos estudios y aplicaciones donde se ha demostrado la efectividad de algunos sistemas de control, aún son pocas las investigaciones que se enfocan en el comportamiento dinámico de edificaciones de MDCR con aislamiento en la base como sistema de control con elementos a escala real. Este estudio se centra en la aplicación de la Simulación Híbrida en Tiempo Real Multi-experimental para el análisis sísmico de una edificación de Muros Delgados de Concreto Reforzado con aislamiento en la base, para tal fin, se realiza una Subestructuración Dinámica la cual nos permite dividir el sistema en un componente numérico y otro experimental. Al igual, un Sistema de Transferencia encargado de la interacción efectiva y retroalimentación en tiempo real entre los dos componentes. Como excitaciones dinámicas se utilizó el Acelerograma del sismo de Pizarro escalado a 1.25g.

Palabras Clave—Aislamiento en la base, Muros Delgados de Concreto Reforzado, Simulación Híbrida en Tiempo Real Multi-experimental, Sistema de Transferencia, Subestructuración Dinámica. .

I. INTRODUCCIÓN

EN los últimos años, la ingeniería estructural se ha basado en el desarrollo de nuevas técnicas constructivas las cuales brindan mejoras sustanciales en el ámbito económico y agilidad en la ejecución de ciertas actividades [9], esto debido a los nuevos requerimientos de vivienda siendo este directamente proporcional al aumento poblacional. Para tal fin se ha incursionado en diferentes sistemas constructivos como lo es el Sistema Industrializado de Construcción de Viviendas (SI). Este sistema consiste en la utilización de Muros Delgados de Concreto Reforzado en gran parte del área en planta de la estructura, no siendo necesario el uso de sistemas a porticados (columnas y vigas). Los concretos utilizados para estos elementos son de alta fluidez para mejores acabados y comúnmente son mezclados con aditivos acelerantes para obtener la resistencia de diseño a edades tempranas, lo que permite fundiciones monolíticas entre muros y losas de un

piso completo en un solo día. [3], [4]. Es en esta etapa donde se presenta la mayor favorabilidad comparada con los demás sistemas constructivos. En Colombia, los MDCR presentan espesores entre 80 y 300 mm con un refuerzo electrosoldado en el alma, dispuesto en generalmente en una sola capa lo cual no genera un “núcleo confinado” y con cuantías de refuerzo típicas de 0.25 %, correspondientes a las mínimas exigidas en la NSR-10 [1], [2]. Dependiendo de sus características de diseño requieren de ciertos tipos de elementos de borde los cuales están conformados por refuerzo longitudinal con acero convencional dúctil y ganchos o estribos cerrados para generar confinamiento. Existen diferentes geometrías para los elementos de borde, pero comúnmente conservan el espesor del alma. A lo anterior se suma el inadecuado confinamiento en los extremos (elementos de borde) lo cual no es necesario para cumplir las demandas a flexo-compresión, generando dificultades constructivas y limitaciones en la capacidad de deformaciones internas. Las losas de entrepiso consisten en placas macizas de concreto reforzado varían espesores entre 100 a 200 mm con refuerzo de malla electrosoldada. Por su condición geográfica, Colombia es un país con amenaza sísmica intermedia a alta y según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-resistente (NSR-10) las condiciones geológicas y sismológicas del país implican que el 87 % de la población se encuentra en zonas de riesgo sísmico considerable [6]. Por lo tanto, cada día se busca la construcción de estructuras resilientes capaces de recuperarse de forma eficiente luego de una exposición a cargas dinámicas considerablemente fuertes. Debido a las condiciones de riesgo sísmico presentes en el territorio colombiano y considerando los espesores de MDCR utilizados en la construcción de edificaciones con SI, se genera la necesidad de implementar sistemas de control capaces de reducir la vulnerabilidad sísmica de este tipo de estructuras. Estos sistemas son métodos alternos para disminuir las solicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base en esquemas de control pasivo, activo, semiactivo e híbrido. Un sistema muy utilizado en países como Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Italia, Canadá y China, son los sistemas pasivos de control estructural por medio de aislamiento en la base; debido a que este sistema no requiere de una fuerza externa de potencia, sino de que los dispositivos producen fuerzas

en respuesta al movimiento de la estructura, es decir: La energía total en un sistema estructural controlado pasivamente, incluyendo los dispositivos pasivos, no aumenta. [26]. El aislamiento en la base se realiza por medio de aisladores sísmicos elastoméricos. Estos tipos de aisladores cuentan con la característica de soportar grandes magnitudes de carga axial permitiendo grandes deformaciones laterales [7]. La metodología de SHTR ofrece una serie de ventajas respecto a los ensayos convencionales cuasi-estáticos o mesas vibratorias tales como: el costo del experimento se puede reducir sustancialmente debido a que la mayor parte de la estructura de referencia se modela numéricamente y la subestructura física puede ser construida a gran escala, ya que sólo una parte de la estructura del prototipo se prueba en el laboratorio [27]. A excepción de las investigaciones realizadas hasta la fecha, este estudio se enfocará en la realización de una SHTR multiaxial para conocer el comportamiento dinámico de una edificación de Muros Delgados de Concreto Reforzado con aislamiento en la base por medio de una excitación sísmica real. Por medio de la Sub-estructuración Dinámica se dividió la estructura aislada en un componente numérico y otro experimental. Para la Sub-estructura Numérica se modeló una estructura de referencia aislada en un Software de elementos finitos ETABS19, para la Sub-estructura Experimental se implementaron probetas de dos tipos, un MDCR a escala real representativo del sistema constructivo empleado y dos aisladores sísmicos elastoméricos a escala reducida no conectados (U-FREI) representativos del sistema de aislamiento en la base. Para la interacción en tiempo real entre los dos componentes se requirió de dos sistemas de transferencia (Mesa Vibratoria y MPH) de la Universidad del Valle. Para la realización de la SHTR se introdujo como excitación dinámica el sismo de Pizarro (Colombia 2004) con una amplitud máxima de 12.26 m/s^2 (1.25g).

II. METODOLOGÍA

II-A. Estructura de referencia

La estructura de referencia corresponde a una edificación de baja altura típica en Colombia, localizada en la ciudad de Santiago de Cali en el departamento del Valle del Cauca. La estructura seleccionada es diseñada con el SI de MDCR y losas de entrepiso con espesores entre 80-100 mm; para el análisis se dispone de un concreto de peso normal con resistencia de $f' = 21.0 \text{ MPa}$ y una densidad volumétrica de muros en planta promedio de 2.0 % y 2.5 % para las direcciones longitudinales y transversales. La edificación consta de seis losas con alturas de entre piso de 2.5 m y dimensiones en planta de 16.5 m y 13.7 m en las direcciones X y Y, respectivamente, Figura 1a. Con el fin de alcanzar una distribución de carga uniforme en la base se dispuso una losa maciza de 100 mm de espesor, vigas de $400 \times 500 \text{ mm}$ y $400 \times 400 \text{ mm}$ las cuales constituyen las cimentaciones de los muros y transmiten la carga a los 12 aisladores elastoméricos, Figura 1b.

La estructura de MDCR construida con aisladores sísmicos en la base fue modelada en el software de elementos finitos ETABS19 utilizando elementos tipo Shell-membrane para losas, Shell-Thin para muros y Frame para las vigas, y con la suposición de diafragma rígido en las losas de todos los

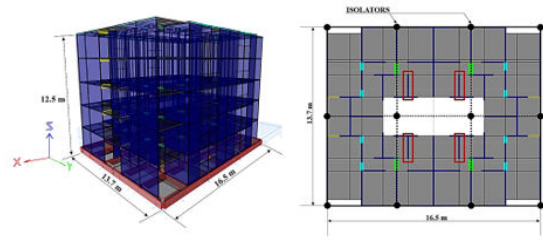


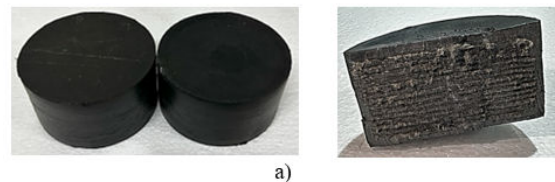
Figura 1. Estructura de referencia; a) Isometría estructural; b) Planta estructural. [9].

niveles. En la condición convencional sin ningún tipo de amortiguamiento en la base, se contemplan las recomendaciones de la NSR-10 tomando un amortiguamiento estructural $\zeta = 5\%$ y las frecuencias en las direcciones X y Y, en los dos primeros modos, fueron de 4.46 y 4.77 Hz, respectivamente. Mientras que, para la condición aislada se alcanzó un periodo objetivo de 1.90 s, desarrollando un comportamiento de cuerpo rígido en la superestructura soportada sobre el sistema de aislamiento. Teniendo en cuenta que para la estructura aislada se supuso el porcentaje de amortiguamiento estructural $\zeta = 0\%$, utilizando únicamente el amortiguamiento suministrado por el comportamiento histerético de los aisladores [9].

II-B. Sistema Aislador

Para disminuir la vulnerabilidad sísmica del Sistema en esta investigación se implementó un sistema de aislamiento sísmico de acuerdo con el procedimiento estipulado en el FEMA 450 [18] y las recomendaciones realizadas por [19]. Los 12 aisladores elastoméricos fueron dimensionados a partir del espectro de diseño de la micro zona No.1 de la ciudad de Santiago de Cali [20] con una Pseudoaceleración máxima de 0.75 g, un periodo objetivo de 1.90 s y una deformación de diseño del 100 %. Se contemplaron 62 capas de caucho y 61 capas de fibra con espesores de $t_r = 5.5 \text{ mm}$ y $t_f = 1.0 \text{ mm}$, respectivamente, alcanzando una altura total de $H = 400 \text{ mm}$ y un diámetro 910 mm. Estos aisladores diseñados se implementaron en el software ETABS19 considerando un comportamiento no-lineal para los grados de libertad longitudinales X y Y [21], con un modelo de histéresis bilineal.

Para términos del ensayo, se utilizaron un par de aisladores elastoméricos no-conectados a escala en el Marco de pruebas de aisladores a escala de la Universidad del Valle, de los cuales se obtuvieron señales previamente por medio de una caracterización dinámica realizada Figura 2a.



La caracterización dinámica del par de aisladores se realizó mediante la ejecución del protocolo de desplazamiento a cortante (Figura 2b) ejercido por el simulador sísmico unidireccional acoplado al marco de ensayo de aisladores a escala

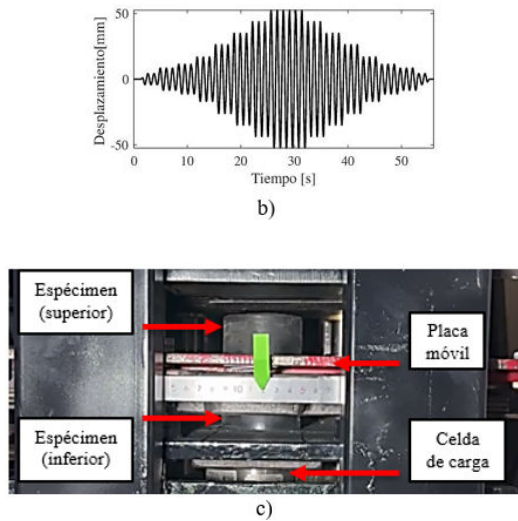


Figura 2. Caracterización de aisladores; a) Aisladores elastoméricos no conectados; b) Protocolo de ensayo; c) Marco de Pruebas de Aisladores a escala.

(Figura 2c). De forma simultánea, se ejercía una carga de compresión constante de 19 kN y se registraba la carga a cortante mediante una celda de carga con capacidad de 1.5 ton. Los resultados de las histerésis y los módulos de cortante mostrada por los especímenes se presentan en la (Figura 3).

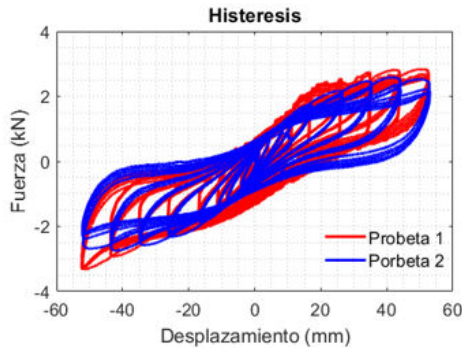


Figura 3. Histerésis de las probetas de aisladores.

II-C. Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR)

Con el objetivo de conocer el comportamiento dinámico de los sistemas estructurales, se requieren novedosas e innovadoras metodologías como lo es en las últimas dos décadas las Simulaciones Híbridas (SH) [10], [11], [12], [13]. Consiste en la interacción entre pruebas experimentales con los análisis numéricos, esto por medio de una subestructuración dinámica la cual nos divide el sistema en un componente experimental y un componente numérico.

El componente experimental corresponde a un elemento físico de la estructura a evaluar y generalmente expone un comportamiento altamente no-lineal y el componente numérico que presenta un comportamiento predecible por lo cual no es prioritario su evaluación total. Ambos componentes o subestructuras logran una interacción continua por medio de sistemas de transferencias los cuales emulan las condiciones

de borde apropiadas con la ayuda de sensores como medio para la mejor interacción, formando un bucle para resolver la respuesta dinámica del sistema en cada paso de tiempo.

La Simulación Híbrida en Tiempo Real (SHTR) guarda o conserva el concepto de subestructuración dinámica utilizado en las SH (Subestructura numérica y experimental), a diferencia de que las SHTR constan con la interacción constante en la interfaz entre los dos subsistemas debido a su ejecución en Tiempo-Real [14], [15]. Lo que mayor destaca de esta metodología de análisis es su capacidad de inducir velocidades correspondientes de la interfaz a las probetas o elementos evaluados experimentalmente, lo que permite realizar diferentes investigaciones de ingeniería sísmica para la evaluación de respuestas de elementos localizados y evaluar el desempeño del sistema a nivel global [16], [17].

La Simulación Híbrida en Tiempo Real en comparación con las metodologías convencionales de análisis estructural (STT, ensayos cuasi-estáticos, etc.) cuentan con la ventaja de optimizar recursos concentrando estos en el componente crítico, altos rendimientos en tiempo y mayor desempeño frente a las limitaciones de capacidad de la experimentación a gran escala.

Para la evaluación dinámica de la estructura de MDCR aislada, se utilizó la técnica de SHTR por medio de una retroalimentación constante a una frecuencia de 1024 Hz, utilizando el Marco de Pruebas y Homologaciones, Simulador Sísmico y Marco de Aisladores de la Universidad del Valle, con un seguimiento de control robusto como sistema de transferencia; garantizando una interacción estable entre la subestructura experimental y la subestructura numérica [9]. Esto nos permite conocer el comportamiento dinámico de la estructura de referencia con aislamiento en la base ante diferentes eventos sísmicos históricos como El centro, Pizarro, Chihuahua, Kobe y Loma Prieta en dos magnitudes 0.75g y 1.25g respectivamente, además se realizó la SHTR de la estructura sin aislamiento con el sismo de Pizarro escalado a diferentes magnitudes 0.75g.

II-D. Subestructura Numérica (SN)

Para el análisis de la estructura se propuso analizar la edificación como un modelo de pórtico a cortante en espacio de estados ajustado con las respuestas obtenidas de la edificación aislada en ETABS19, analizando únicamente el eje Y de la estructura. Para el sistema aislado se utiliza un modelo tipo Bouc-Wen extendido para representar el comportamiento histerético altamente no – lineal del sistema aislado [23]. En total el modelo se conforma por un pórtico a cortante de 6-GDL traslacionales ajustados para un análisis de excitación en la base sinusoidal con amplitud constante para frecuencias entre 0.1-20 Hz. Tal planteamiento del modelo y distribución de masa se muestra en la Figura 4, los valores de estas propiedades son registrados en la Tabla I.

La ecuación de movimiento que simula el comportamiento dinámico de la estructura se presenta en la Ecuación 3, donde M_r , C_r y K_r son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez representativas del modelo simplificado de 6-GDL; y X , $\dot{X}$ y $\ddot{X}$ corresponden a los estados de desplazamiento,

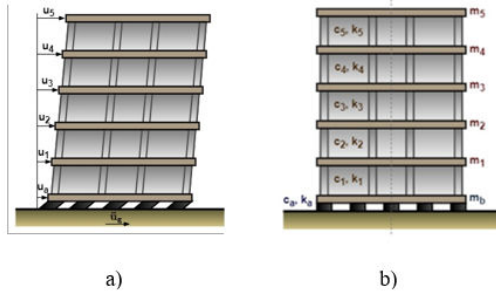


Tabla I
VALORES DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LA EDIFICACIÓN AISLADA

Nivel de Piso	Masa M_i (Ton)	Rigidez K_i (KN/m)	Amortiguamiento C_i (KN* s/m)
Base Aislada	171.91	BW^*	BW^*
No. 1	159.83	$3091.80 \cdot 1e3$	$3549.80 \cdot 1e3$
No. 2	159.88	$1787.00 \cdot 1e3$	$2186.70 \cdot 1e3$
No. 3	159.88	$1197.72 \cdot 1e3$	$1571.00 \cdot 1e3$
No. 4	159.88	$845.42 \cdot 1e3$	$1202.90 \cdot 1e3$
No. 5	138.83	$470.45 \cdot 1e3$	$769.02 \cdot 1e3$

*BW $\rightarrow$ Propiedad variable en modelo Bouc-Wen.

velocidad y aceleración relativos. Aplicando subestructuración dinámica [24], [25] se extrajo la acción del sistema aislado, del modelo numérico de la edificación aislada, para ser incluido como una fuerza entrante al sistema mediante el modelo numérico de Bouc-Wen extendido y la acción de los especímenes de aisladores; adicionalmente, se realiza esta misma metodología para extraer las propiedades del MDCR del modelo numérico de la edificación e incluirlo como otra fuerza entrante en este sistema. Lo anterior permite una retroalimentación del modelo numérico de la edificación aislada con la fuerza medida experimentalmente de la probeta de MDCR $\Gamma_{MDCR} F_{MDCR}$ y de los aisladores experimentales $\Gamma_{Ais} F_{Ais}$, como se plantea en la Ecuación 1. [9].

$$M_r \{\ddot{x}\} + C_r \{\dot{x}\} + K_r \{x\} = -M_r \Gamma_g a_g \quad (1)$$

$$M_n \{x\} + C_n \{\dot{x}\} + K_n \{x\} = -M_r \Gamma_g a_g - \Gamma_{Ais} F_{Ais} - \Gamma_{MDCR} F_{MDCR} \quad (2)$$

Las fuerzas restauradoras del sistema, producto de la fuerza experimental registrada de los MDCR, está determinada por el termino $\Gamma_{MDCR} F_{MDCR}$, donde el vector de influencia Γ_{MDCR} = forma, a_g representa la aceleración del suelo y el vector $\Gamma_g = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ especifica la incidencia del sismo en los GDL. Finalmente, el término $\Gamma_{Ais} F_{Ais}$ indica la fuerza del modelo numérico de aislamiento y $\Gamma_{Ais} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ el GDL de incidencia.

II-E. Subestructura Experimental (SE)

Para la subestructura experimental se implementó un MDCR sin afectación denominado M3R10 del cual se puede identificar gráficamente una descripción en: Figura 5. Al igual el

uso de dos probetas experimentales a escala de aisladores sísmicos Figura 2a. ubicados en el Marco de Aisladores de la Universidad del Valle Figura 2c.

La probeta experimental cuenta con una resistencia del concreto de $f'_c = 24.5 \text{ MPa}$, una carga vertical de 19.5 Ton. En Tabla 2 se describe la configuración y geometría del muro M3R10 el cual está conformado por:

Tabla II
MATERIALES Y REFUERZO DE LOS ELEMENTOS CONFORMANTES DEL MDCR

Muro Elemento	Base (m)	Altura (m)	Largo (m)	f'_c (MPa)	Refuerzo Longitudinal	Refuerzo Transversal
M3R10 Viga superior	0.32	0.30	1.70	24.5	$4N^{\circ}4$	$8EN^{\circ}4 @ 0.225$
M3R10 Viga inferior	0.54	0.4	2.30	24.5	$4N^{\circ}5 + 4N^{\circ}4$	$16EN^{\circ}4 @ 0.125$
Elemento M3R10 de borde (Oeste)	0.1	2.40	0.20	24.5	$2N^{\circ}5 + 1N^{\circ}4$	$42GN^{\circ}2 @ 0.075$
Elemento M3R10 de borde (Este)	0.1	2.40	0.20	24.5	$2N^{\circ}5 + 1N^{\circ}4$	$22GN^{\circ}2 @ 0.15$
M3R10 Muro	0.1	2.40	1.50	24.5	$MES07$	$Mc/0.15$

Para el refuerzo de cada uno de los elementos conformantes del muro M3R10 se realizó su respectivo despiece, el resumen de dicho procedimiento se encuentra especificado en Tabla II. Donde se indican las propiedades geométricas y de los materiales utilizados.

El montaje final del MDCR M3R10 en el Marco de Pruebas y Homologaciones de la Universidad del valle se resume en la Figura 4-5 donde se evidencia la configuración de los elementos especificada anteriormente, la instrumentación utilizada para conocer el comportamiento del muro y del refuerzo en cualquier instante de tiempo. Además, se realizó un tratamiento de pintura en color blanco con una serie de puntos negros ubicados de forma aleatoria en el muro, esto con el objetivo de conocer los desplazamientos en cualquier parte del muro en el plano X y Y. Esta metodología de análisis se denomina Correlación Digital de Imágenes (DIC por sus cifras en inglés).

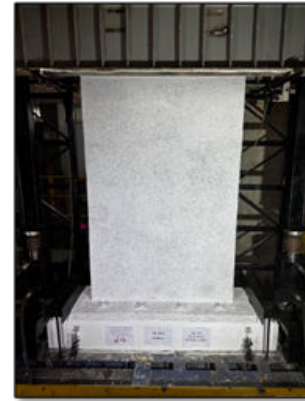


Figura 5. Montaje M3R10 en el Marco de Pruebas y Homologaciones

II-F. Sistema de Transferencia (ST)

En las SHTR, los ST tienen la tarea de transmitir físicamente, en la interfaz entre las subestructuras, la respuesta del componente numérico sobre el experimental y, mediante el sistema de adquisición, registrar su respuesta para retroalimentar nuevamente a la subestructura numérica, esto en cada paso de tiempo Δt . La respuesta de la edificación de MDCR

aislada se determinó mediante la técnica de SHTR, empleando como subestructura experimental el MDCR M3R10 y las dos probetas de aisladores sísmicos en el Marco de Aisladores de la Universidad del Valle. El resto la estructura aislada como componente numérico. Para ello, se utilizó como sistema de transferencia a cortante el Marco de Pruebas y Homologaciones (MP-H) y sistema de transferencia horizontal de los aisladores la Mesa Sísmica de la Universidad del Valle

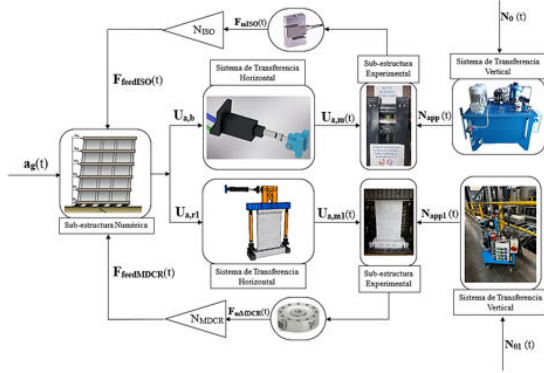


Figura 6. Diagrama de SHTR

II-G. Excitaciones Sísmicas

Para determinar el desempeño sísmico de la edificación de MDCR con aislamiento en la base, se realizaron diferentes SHTR bajo diferentes excitaciones sísmicas correspondientes a los sismos de El Centro (USA 1940), Pizarro (Colombia 2004), Chihuahua (México 2013), Loma Prieta (USA 1989), Kobe (Japón 1995); con amplitudes máximas de 7.36m/s^2 (0.75g) y 12.26m/s^2 (1.25g) respectivamente, para el caso de este estudio se basó en el análisis de respuesta de la estructura ante el evento sísmico de Pizarro escalado a 1.25g .

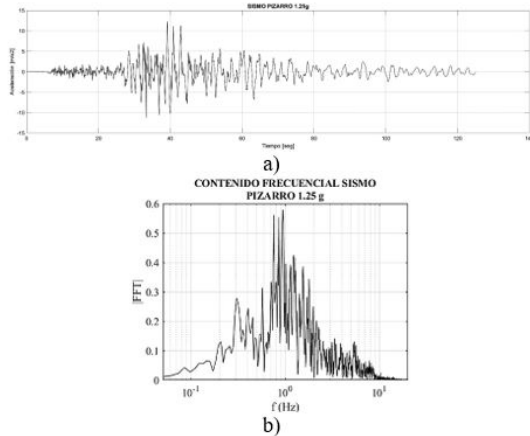


Figura 7. Sismo de Pizarro 0.75g ; a) Acelerograma; b) Contenido Frecuencial

III. RESULTADOS

Se realizó la SHTR por medio de la excitación sísmica del sismo de Pizarro escalado a 1.25g , Figura 13b. Para este caso de estudio se analiza la información relacionada a los desplazamientos de los aisladores, desplazamiento del MDCR y los diferentes diagramas de histéresis de los dos elementos.

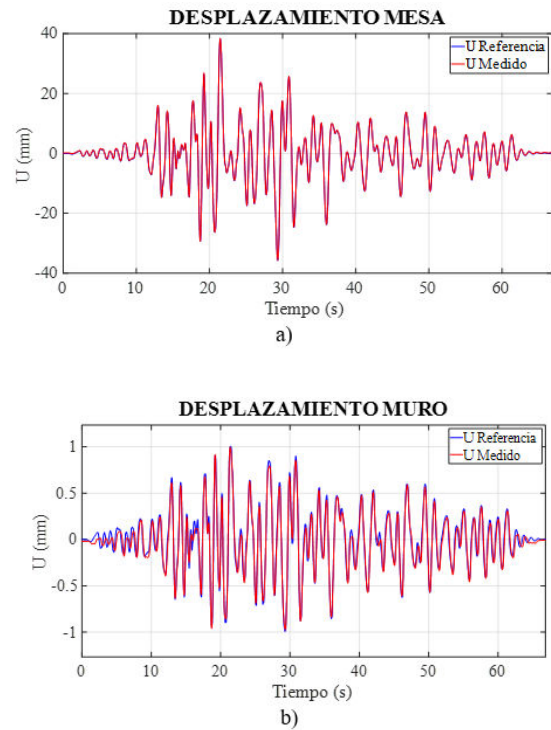
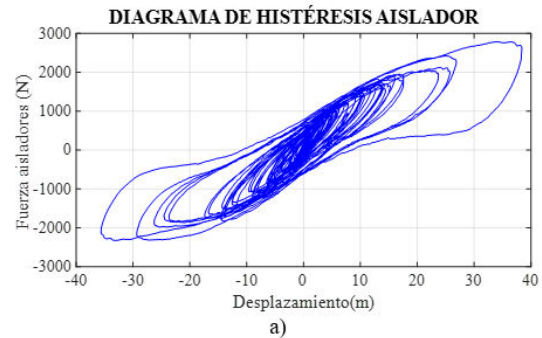


Figura 8. Desplazamientos obtenidos; a) Desplazamiento de los aisladores; b) Desplazamiento del MDCR.

En la Figura 8a, se pueden observar las mediciones respecto al desplazamiento lateral U mm de los dos aisladores siendo este de 38.34 mm . En la Figura 8b, está representado el desplazamiento lateral de la probeta experimental de MDCR siendo este de 1.03 mm .



En la Figura III, se logra observar la histéresis de cada probeta experimental por parte del sistema de aisladores y el sistema estructural. Para el espécimen de cada aislador se puede evidenciar un comportamiento viscoelástico común en estos dispositivos debido a sus componentes. Por parte de la probeta de MDCR se evidencia un comportamiento elástico ya que no se ve afectada la resistencia del muro durante la SHTR aislada. Las SHTR cuentan con algunos índices de evaluación debido a que existen factores inherentes que generan error entre los resultados del ensayo y los sistemas completamente experimentales. El primer valor es el índice de evaluación de frecuencia o FEI, otro parámetro de evaluación es la amplitud generalizada ($A0$). Finalmente, el retraso en tiempo o delay

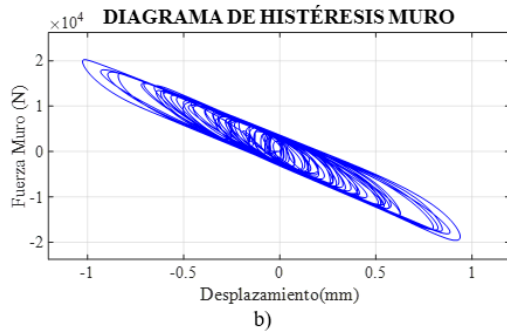


Figura 9. Diagrama de histéresis; a) Histéresis aisladores; b) Histéresis del MDCR.

(δ) [27].

Tabla III
ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE SHTR

Sismo	FEI	A_0	$e_{DM}(\%)$	$\delta(ms)$
Pizarro 1.25 g	1.0064 – 0.0427i	1.01	1.94	5.38

Según los índices de evaluación obtenidos de la SHTR con el sismo de Pizarro con magnitud de 1.25g, Tabla III, se observa un alto nivel de seguimiento de la respuesta con valor de amplitud generalizada A_0 cercano a 1.0, un error menor al 2% y delay en el tiempo menor a 5.5 ms.

IV. CONCLUSIONES

- Se realizaron pruebas de SHTR de la edificación mencionada bajo el evento histórico del sismo de Pizarro (Colombia 2004) escalado a una amplitud de $12.26m/s^2$.
- Al sistema de aislamiento se le indujo un desplazamiento lateral máximo de 38.40 mm, mientras que el sistema estructural registró un desplazamiento de 1.00 mm. Esto presenta una reducción aproximada del 97.40% en el desplazamiento respecto al desplazamiento inducido.
- El aislador utilizado para el sistema de aislamiento disipó una cantidad $70.37N \cdot m$ de energía.
- Según el diagrama de histéresis del sistema de aislamiento, se evidencia un comportamiento viscoelástico común en los aisladores elastoméricos debido a las propiedades flexibles y resilientes de sus componentes.
- El Marco de Pruebas y Homologaciones MP.H como sistema de transferencia horizontal presenta alto rendimiento al momento de transferir la respuesta de la estructura al MDCR, por lo cual permite realizar las SHTR con un nivel destacado de precisión.

REFERENCIAS

- [1] Dyke, S. J., Stojadinovic, B., Arduino, P., Garlock, M., Luco, N., Ramirez, J. A., & Yim, S. (2010). Vision 2020: An Open Space Technology Workshop on the Future of Earthquake Engineering: A Report on the NSF-Funded Workshop. Held January 25-26, 2010 St. Louis, Missouri, USA. ETH Zurich.
- [2] Sánchez, J., & Arteta, C. A. (2017). Caracterización estadística de edificios de muros delgados en concreto reforzado para zonas de amenaza sísmica alta. In VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. R. Fardel, M. Nagel, F. Nuesch, T. Lippert, and A. Wokaun, "Fabrication of organic light emitting diode pixels by laser-assisted forward transfer," Appl. Phys. Lett., vol. 91, no. 6, Aug. 2007, Art. no. 061103.
- [3] Gil Guzmán, D. A., & Cano Gómez, L. M. (2018). Reporte Burkenroad: Cementos Argos SA (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- [4] Caraballo, R. O., Torres, P., Marulanda, J., Thomson, P., & Areiza, G. (2021). Desempeño sísmico de muros delgados y esbeltos de concreto reforzado representativos de la construcción industrializada. Hormigón y Acero.
- [5] Almeida, J., Prodan, O., Rosso, A., & Beyer, K. (2016). Tests on thin reinforced concrete walls subjected to in-plane and out-of-plane cyclic loading. Earthquake Spectra, 33(1), 323–345. <https://doi.org/10.1193/101915EQS154DP>
- [6] Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. (2017). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- [7] "Aisladores Sísmicos | DISIPA Ingenieros". Disponible en: <http://www.disipaing.com/aisladores-sismicos/>. Consultado: 20-jun-2023.
- [8] Najafi, A., & Spencer Jr, B. F. (2021). Validation of model-based real-time hybrid simulation for a lightly-damped and highly-nonlinear structural system. Journal of Applied and Computational Mechanics, 7(Special Issue), 1252-1265.
- [9] Serna M., Edgar. (2022). Ingeniería y desarrollo en la Nueva Era. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7381846>
- [10] Nakata, N., Dyke, S., Zhang, J., Mosqueda, G., Shao, X., Mahmoud, H. & Song, C. (2014). Hybrid simulation primer and dictionary.
- [11] Takanashi, K., & Nakashima, M. (1987). Japanese activities on on-line testing. Journal of Engineering Mechanics, 113(7), 1014-1032.
- [12] Darby, A. P., Blakeborough, A., & Williams, M. S. (1999). Real-time substructure tests using hydraulic actuator. Journal of Engineering Mechanics, 125(10), 1133-1139.
- [13] Nakashima, M., Kato, H., & Takaoka, E. (1992). Development of real-time pseudo dynamic testing. Earthquake engineering & structural dynamics, 21(1), 79-92.
- [14] Darby, A. P., Blakeborough, A., & Williams, M. S. (1999). Real-time substructure tests using hydraulic actuator. Journal of Engineering Mechanics, 125(10), 1133-1139.
- [15] Silva, C. E., Gomez, D., Maghareh, A., Dyke, S. J., & Spencer Jr, B. F. (2020). Benchmark control problem for real-time hybrid simulation. Mechanical Systems and Signal Processing, 135, 106381.
- [16] Shao, X., & Griffith, C. (2013). An overview of hybrid simulation implementations in NEES projects. Engineering Structures, 56, 1439-1451.
- [17] Gomez, D., Dyke, S. J., & Maghareh, A. (2015). Enabling role of hybrid simulation across NEES in advancing earthquake engineering. Smart Structures and Systems, 15(3), 913-929.
- [18] BSSC. 2003. "Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)." FEMA: Washington, DC, USA.
- [19] Losanno, Daniele, Ingrid E. Madera Sierra, Mariacristina Spizzuoco, Johannie Marulanda, and Peter Thomson. 2019. "Experimental Assessment and Analytical Modeling of Novel Fiber-Reinforced Isolators in Unbounded Configuration." Composite
- [20] SÍSMICA, E. D. M., & DE SANTIAGO, D. C. Informe 1-7 Elementos Sismológicos para la Caracterización de la Actividad Cortical en el Occidente Colombiano.
- [21] CSI, C. (2015). Analysis reference manual for sap2000, etabs, safe and csbridge. Computers and Structures, Inc., Berkeley, CA, USA.
- [22] Riascos-González, C. A., Thomson, P., & Dyke, S. (2019). Performance evaluation of a non-linear tuned mass damper through real-time hybrid simulation. INGE CUC, 15(2), 11-22.
- [23] Riascos, C., Klopov, S., Losanno, D., Marulanda, J., & Thomson, P. (2022). Real-time hybrid simulations including rocking effects: The case of a frame-structure with unbounded elastomeric isolators. Structural Control and Health Monitoring, e2984.
- [24] Takanashi, K., Udagawa, K., Seki, M., Okada, T., & Tanaka, H. (1975). Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system. Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, 8, 1-17.
- [25] Mahin, S. A., Shing, P. S. B., Thewalt, C. R., & Hanson, R. D. (1989). Pseudodynamic test method—Current status and future directions. Journal of Structural Engineering, 115(8), 2113-2128.
- [26] D. Gómez, J. Marulanda, and P. Thomson, "Sistemas de control para la protección de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas," DYNA, vol. 75, no. 155, pp. 77–89, 2008.
- [27] Solarte, Alexander. (2019). "Simulación Híbrida en Tiempo Real para la Evaluación de Estructuras."

Análisis de la Interacción Humano-Estructura: Incorporando la Variabilidad Antropométrica en Modelos Robustos

Julian Calonge¹, Daniel Gomez² y Albert Ortiz³

Abstract—En los últimos años, se han introducido nuevas técnicas de diseño que permiten la construcción de estructuras grandes y delgadas utilizando materiales ligeros y de alta resistencia. Sin embargo, este tipo de estructuras, como tribunas, escaleras, losas y puentes peatonales delgados, pueden experimentar problemas de vibraciones excesivas, especialmente cuando son sometidos a excitaciones dinámicas debido a la actividad humana. El movimiento de las personas al caminar, saltar o simplemente estar de pie afecta el comportamiento de la estructura, y a su vez, la estructura influye en el movimiento humano. Este fenómeno se conoce como interacción humano-estructura (IHE). Los modelos propuestos para abordar la IHE generalmente se han desarrollado desde una perspectiva determinista, lo que significa que no logran representar de manera precisa esta interacción debido a la falta de consideración de la alta variabilidad antropométrica de las personas en el análisis. Esto puede resultar en una predicción inadecuada de la respuesta estructural y dar lugar a desplazamientos y vibraciones inesperadas que afectan tanto el confort de las personas como la estabilidad de la estructura. En esta investigación, se ha desarrollado un modelo de masa-resorte-amortiguador (MCK) y dos modelos de control robusto con el objetivo de caracterizar la incertidumbre asociada a la variación de las propiedades mecánicas tanto del ser humano como de una estructura de ensayo. Estos modelos incorporan parámetros dinámicos variables en el análisis. Se ha demostrado una adecuada predicción de la respuesta estructural en una amplia gama de propiedades biomecánicas al comparar las respuestas simuladas por los modelos robustos con incertidumbre y los registros experimentales. Esto demuestra que se logra modelar de manera más precisa el efecto del ser humano en la IHE, ya que estos sistemas son capaces de estimar mejor la dinámica del sistema acoplado en comparación con el modelo tradicional MCK.

Index Terms—control robusto, incertidumbres paramétricas, interacción humano-estructura, optimización

I. INTRODUCCIÓN

EL análisis de las vibraciones excesivas causadas por las actividades humanas en estructuras esbeltas, de bajo amortiguamiento y alta relación entre carga viva y carga muerta, es un aspecto crítico en la Ingeniería Civil [1]–[3]. Cuando la frecuencia fundamental de una estructura es inferior a 5 Hz, las actividades humanas como caminar, correr o saltar pueden inducir el fenómeno de resonancia [4]–[6]. Por lo tanto, comprender los efectos que las personas tienen en las

estructuras se vuelve cada vez más importante en el diseño estructural.

La interacción entre el ser humano y una estructura puede alterar su comportamiento dinámico, y a su vez, la estructura puede influir en la frecuencia y el patrón de la actividad humana [7], [8]. Este fenómeno se conoce como interacción humano-estructura (IHE). Sin embargo, muchos de los modelos propuestos para representar esta interacción son deterministas y no logran captar completamente el efecto bidireccional debido a las múltiples incertidumbres asociadas al ser humano. Por lo tanto, es necesario desarrollar nuevos modelos que consideren la variabilidad antropométrica en el análisis.

El objetivo de esta investigación es desarrollar modelos robustos de IHE con incertidumbres, ajustados utilizando registros experimentales obtenidos por Ortiz en 2016 [9], para predecir de manera precisa la respuesta estructural a pesar de la variabilidad en las propiedades biomecánicas del ser humano. Estos modelos permitirán comprender y abordar de manera más efectiva los efectos de la interacción humano-estructura, mejorando así el diseño y la seguridad de las estructuras sometidas a actividades humanas.

II. MODELOS DE IHE

En esta investigación, se emplearon los datos experimentales obtenidos por Ortiz [9] en ensayos realizados en una estructura de acero configurable. Estos registros permiten ajustar modelos de IHE a partir de la medición de la respuesta estructural en aceleración generada por personas en reposo.

A. Modelo de la estructura

La estructura utilizada consiste en un marco liviano de acero en voladizo con soportes fijos y móviles, lo que permite ajustar la rigidez, y se pueden acoplar bloques de concreto para modificar la masa. De esta manera, se logra cubrir un rango de frecuencia entre 3 Hz y 10 Hz, representando tanto tribunas flexibles como rígidas. La Figura 1 muestra la estructura de referencia utilizada en este estudio.

Para modelar la estructura, se propone un sistema dinámico ajustado mediante técnicas de optimización para obtener los parámetros de frecuencia y coeficiente de amortiguamiento en las direcciones vertical y horizontal. Luego, se introduce variabilidad en estos parámetros dinámicos para considerar la incertidumbre asociada a la estructura en el análisis de la IHE.

¹ Estudiante de Maestría, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia julian.calonge@correounivalle.edu.co

² Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia

³ Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia



Fig. 1. Estructura de referencia. Adaptada de Ortiz [9].

B. Modelo MCK con incertidumbre

En la IHE, el modelo mecánico MCK de un grado de libertad (GDL) o múltiples grados de libertad (MGDL) es comúnmente utilizado para representar al humano. En este trabajo, se analizará el modelo MCK de 1 GDL, pero se incorporará variabilidad en los parámetros biomecánicos del humano mediante el uso de incertidumbres paramétricas y transformaciones fraccionarias lineales (TFL). Esta aproximación permite generar un modelo con incertidumbres capaz de predecir la respuesta estructural para una amplia variedad de personas, en lugar de representar determinísticamente a un único individuo. Debido a que los parámetros humanos se conocen de manera imprecisa, la dinámica del sistema que considera esta incertidumbre se describe como

$$(\bar{m}_h + \delta_m)\ddot{u}_h + (\bar{c}_h + \delta_c)\dot{u}_h + (\bar{k}_h + \delta_k)u_h = -(\bar{m}_h + \delta_m)\ddot{u}_{sv} \quad (1)$$

donde $\bar{m}_h$, $\bar{c}_h$ y $\bar{k}_h$ corresponden a los valores nominales de la masa, el coeficiente de amortiguamiento y la rigidez del ser humano en dirección vertical, respectivamente. El desplazamiento, la velocidad y la aceleración del centro de masa del humano en dirección vertical se denotan como u_h , $\dot{u}_h$ y $\ddot{u}_h$, mientras que la aceleración de la estructura en el sentido vertical se representa como $\ddot{u}_{sv}$. Las variaciones de los parámetros en un rango real que se define a partir de las observaciones de los registros experimentales se definen como δ_m , δ_c y δ_k .

C. Modelos de control robusto

En esta sección, se presentan dos sistemas de control robusto para modelar la IHE utilizando las metodologías de optimización H_∞ y μ -síntesis. Estos sistemas representan la acción de control ejercida por el ser humano sobre las estructuras y se plantean como sistemas de una entrada y una salida (SISO). La señal medida utilizada es la aceleración vertical experimental de la estructura ($\ddot{u}_{sv}$) cuando está ocupada por una persona, mientras que la señal de salida representa la fuerza ejercida por el humano sobre la estructura. La principal diferencia entre estos dos sistemas de control radica en la forma en que se aborda la incertidumbre. Para el controlador H_∞ , la variabilidad de los parámetros de la planta no se

considera en el diseño, sino en el análisis de robustez. Por otro lado, el controlador μ -síntesis toma en cuenta la incertidumbre desde el diseño mismo del controlador. La planta a controlar se refiere al subsistema de un GDL de la estructura previamente definida, teniendo en cuenta la variabilidad en sus parámetros dinámicos.

El primer modelo de control robusto se obtiene a partir de la optimización de la norma H_∞ , que consiste en encontrar un controlador K que minimice la siguiente expresión

$$\|F_i(\mathbf{P}, \mathbf{K})\|_\infty = \max_w \bar{\sigma}(F_i(\mathbf{P}, \mathbf{K})(j\omega)). \quad (2)$$

donde $\mathbf{P}$ representa la planta, $\mathbf{K}$ el controlador y F_i las TFL entre estos sistemas. Posteriormente, se desarrolla un segundo sistema de control robusto para representar la IHE utilizando la técnica de μ -síntesis. En este proceso, se utiliza el método de la iteración DK, que consta de varios pasos. El primer paso consiste en encontrar un controlador H_∞ que minimice la ganancia nominal del sistema en lazo cerrado. Luego, se realiza un análisis de robustez (Paso D) para evaluar el desempeño del controlador frente a incertidumbres. A continuación, se busca un nuevo controlador que minimice este valor (Paso K), y se repite este proceso hasta que el rendimiento robusto no mejore.

III. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Inicialmente, se procede al desarrollo de un modelo nominal MCK de un grado de libertad que permite obtener diferentes valores de masa, amortiguamiento y rigidez del modelo dinámico del humano. Estos valores se determinan a partir de registros experimentales de aceleración obtenidos de sujetos de prueba sobre una estructura de ensayos. Este modelo brinda la posibilidad de cuantificar un rango de incertidumbre asociado a los parámetros biomecánicos, el cual es aplicado en el modelo MCK con incertidumbre.

Posteriormente, se desarrollan dos modelos de control robusto que incorporan incertidumbres paramétricas en la planta. Estos modelos logran un ajuste adecuado a los registros experimentales, ya que la envolvente de respuestas modeladas captura de manera precisa los registros experimentales correspondientes a los diferentes sujetos sobre la estructura. Además, presentan un menor error de ajuste y validación en comparación con el modelo MCK tradicional, lo que implica una mejora significativa en el análisis dinámico de la interacción humano-estructura (IHE). La Figura 2 muestra los resultados obtenidos, mientras que la Figura 3 ilustra un ejemplo de los modelos desarrollados.

En las Figuras presentadas se puede observar que los modelos robustos con incertidumbres logran representar de manera adecuada la interacción humano-estructura (IHE), ya que el error de validación es menor en comparación con el modelo MCK tradicional. Los resultados también demuestran la importancia de incluir incertidumbres paramétricas en los modelos de control robusto de IHE para realizar un análisis preciso de la variabilidad en las propiedades antropométricas de las personas. Gracias a esta inclusión, se logra modelar de manera más precisa el efecto del humano en la IHE, ya que estos sistemas son capaces de estimar de mejor manera la

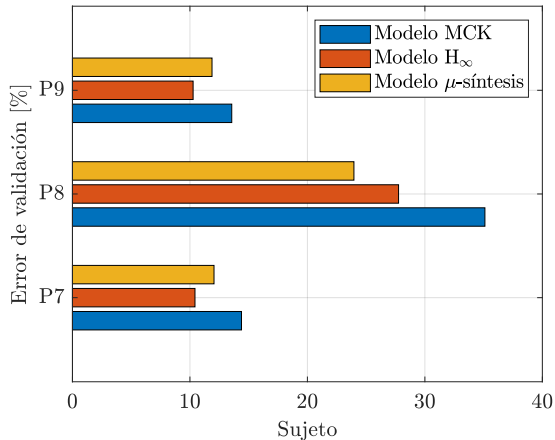


Fig. 2. Validación de los modelos robustos desarrollados.

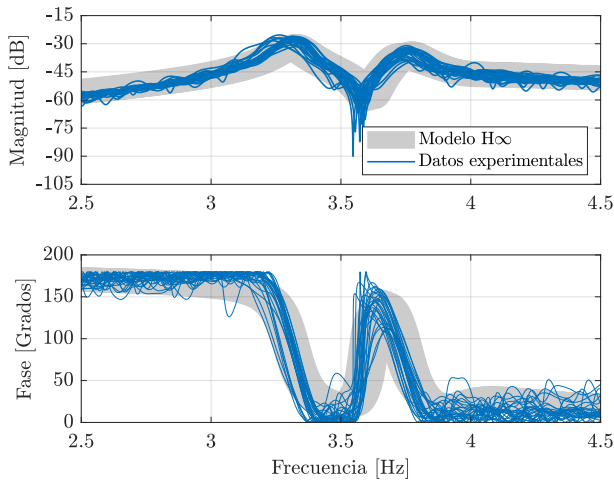


Fig. 3. Respuesta en frecuencia experimental y modelada con incertidumbre de la estructura ocupada para el grado de libertad vertical.

dinámica del sistema acoplado en comparación con el modelo tradicional MCK.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad del Valle mediante el proyecto de convocatoria interna 21125: Desarrollo de modelos de interacción humano-estructura basados en la teoría de control por realimentación.

REFERENCIAS

- [1] V. Racic, A. Pavić y J. Brownjohn, "Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review.", *Journal of Sound and Vibration.*, Vol. 326, No. 1-2, 2009, pp. 1–49.
- [2] B. Lin, Q. Zhang, F. Fan y S. Shen, "A damped bipedal inverted pendulum for human–structure interaction analysis.", *Applied Mathematical Modelling.*, Vol. 87, 2020, pp. 606–624.
- [3] D. Gomez, S. Dyke y S. Rietdyk, "Structured uncertainty for a pedestrian structure interaction model.", *Journal of Sound and Vibration.*, Vol. 474, No. 115237, 2020.

- [4] B. Ellingwood y A. Tallin, "Structural serviceability: floor vibrations.", *J. Struct. Eng.*, Vol. 110, No. 2, 1984, pp. 401–418.
- [5] A. Cunha y C. Moutinho, "Active control of vibrations in pedestrian bridges.", En *Conference of the European association for structural dynamics.*, eurodyn'99., Vol. 2, 1999, pp. 783–788.
- [6] L. Wang, S. Nagarajaiah, W. Shi y Y. Zhou, "Semi-active control of walking induced vibrations in bridges using adaptive tuned mass damper considering human-structure interaction.", *Engineering Structures.*, Vol. 244, No. 112743.
- [7] E. Ahmadi, C. Caprani y S. Živanovic, "A framework for quantification of human-structure interaction in vertical direction.", *Journal of Sound and Vibration.*, Vol. 432, 2018, pp. 351–372.
- [8] A. Ortiz y J. Caicedo, "Modeling the effects of a human standing on a structure using a closed loop–control system.", *Journal of Engineering Mechanics.*, Vol. 145, No. 04019025.
- [9] A. Ortiz, "Modeling Human-Structure Interaction Using a Controller System.", PhD Thesis., Vol. 145, No. 04019025. University of South Carolina, 2016.

Research on Social Impacts for the Wind Power Projects Management in La Guajira, Colombia

Valentina Cardozo-Torres¹ and Milton M. Herrera²

Abstract—Renewables contribute to the reduction of greenhouse emissions around the world. Since 2019, Colombia promoted the adoption of the renewable energy auctions, following the international agreements. Camellias wind power project was born, at least as a contract with Colombian Government in the department of La Guajira. Nevertheless, this project currently has 4 years later and it's not clear if when the projects is going to be on a productive stage. Therefore, this paper aims to present a simulation modelling approach for assessing the social impacts of wind projects. Using camellias project for reflecting real data, it reveals the relationship between technical variables and social impacts of projects. It is a first approach to evaluate a system for forecasting benefits of renewable energy projects, raised as a stakeholder management tool.

Index Terms—Modeling, Social Impact, Renewable Energy, Project Management.

I. INTRODUCTION

ONE of the most important global challenges of the century is the reduction of greenhouse effect emissions; Renewable Energies is a huge opportunity to reducing emissions, especially on the energy sector [1]. In 2019, as part of Colombian auction strategy for renewable energy, Camellias wind power project was born, at least as a contract with Colombian Government In the department of la Guajira [2].

On a first start, Camellias Project was planned to enter in operation in January of 2022, but up to march of 2023, the percentage of completion was only 48% and because of delays in the construction of the transmission grid, the start day of the project is unknown [3], [4]. Regarding the inform of following projects, this project has overcome the agreements with ethnic communities, but the transmission grid is affecting the construction of the project, this is an example that a delay caused by concatenated projects [4], [5].

Effective project management requires a deep understanding of the impacts of projects because these impacts are seen as expectations from each stakeholder, these expectations must be managed, for the convenience of making the project a success [6]. Simulation is a valuable tool for forecasting long-term effects on stakeholders [7], it can be made as an analogy of a mockup that can be used as a tool for selling the projects

“This work was supported by the Universidad Militar Nueva Granada under research project “Diseño de un indice para las tecnologías verdes en Latinoamérica” Grant IMP-ECO-3402, 2021.” (Corresponding author: M. M. Herrera).

¹ Valentina Cardozo-Torres is a master's in project management student at the Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia. est.valentina.cardt@unimilitar.edu.co

² Milton M. Herrera is a Senior Researcher in simulation modelling at the Economic Sciences Research Centre in the Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia. milton.herrera@unimilitar.edu.co

to each stakeholder. Simulation has been used in the past, for studying project management on wind power projects. [8], [9], [10]. This paper aims to present a model approach for social impacts of wind projects. Several studies used also dynamic systems to model renewable energy stalled capacity [11], [12]. The article is divided into the following sections including this introduction. Session 1 presents the modeling methodology used to address the problem. Finally, the results and conclusions are discussed in Session 3.

II. MODELING APPROACH

In the simulation model created, the installed capacity has a closed loop that has different stages for the energy megaproject management: planning, farms in construction, installed wind farms or lost (depletion).

In the case of Colombia, nowadays there are several wind power projects. At the time, Camellias project has a big risk of passing from planned to a depletion stage, and this is a loss of renewable energy capacity for the country, not only for investors, but also to the whole society.

Different variables will be explored, included in sustainable categories of technical, environmental, economic, and social [13], [14]. The simulation encompasses a range of technical variables, such as planned, under construction, installed, and obsolete/lost wind capacity.

Additionally, it considers factors like the wind resource availability index, space availability, life cycle, and time to completion of the projects. Fig. 1 shows the drivers consider starting the wind power projects.

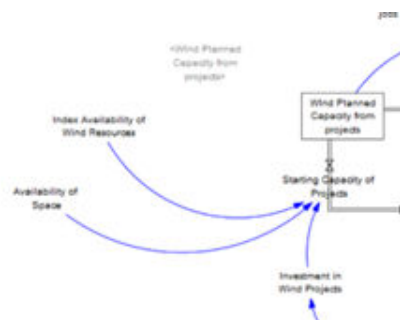


Fig. 1. Drivers for Starting Capacity of projects.

The primary environmental variable under scrutiny is the reduction of CO_2 emissions achieved through clean wind energy adoption. Fig. 2 present the relationships between grow index CO_2 and levels of CO_2 reduction for the case study. This variable plays an essential role to understand the behavior

of the change generates to increase of new wind power farms in Colombia.

Although camellias project only represents 269.9 of MWh and this is not seen as a big reduction of the overall emissions of Colombia [4], it's an indicator of other important but more difficult to simulate relationships. For example, the benefit in health for communities around carbon thermoelectric plants, for replacing fossil fuels with clean energies [15].

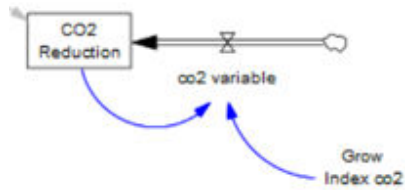


Fig. 2. CO_2 Reduction. Own Elaboration.

On the social front, the simulation focuses on the number of jobs created and the positive impact on families due to the adoption of clean wind energy.

Jobs Created is expressed as a sum of direct and indirect wind jobs, as illustrated in Fig. 3, and taking into account that some of these jobs will benefit directly the local communities, while others will be for citizens not in the area of influence of the project.

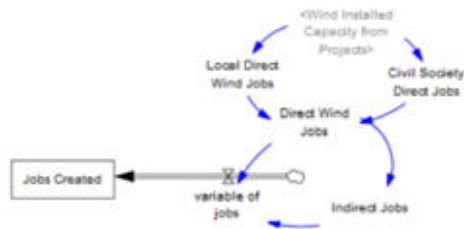


Fig. 3. CO_2 Jobs Created. Own Elaboration.

As for economic aspects, the simulation considers investment in wind projects, electricity price, profit margins, and electricity demand.

By modeling and simulating these variables in a virtual environment, researchers can explore diverse scenarios and management approaches to evaluate the feasibility and potential outcomes of wind energy projects effectively.

Furthermore, the importance of considering social aspects in decision-making related to wind projects is examined.

The successful implementation of these projects requires active collaboration among developers, local communities, and other stakeholders.

III. RESULTS

System Dynamics (SD) simulation can help identify key factors that influence the acceptance and social impact of projects, which in turn can guide decision-making and improve their management.

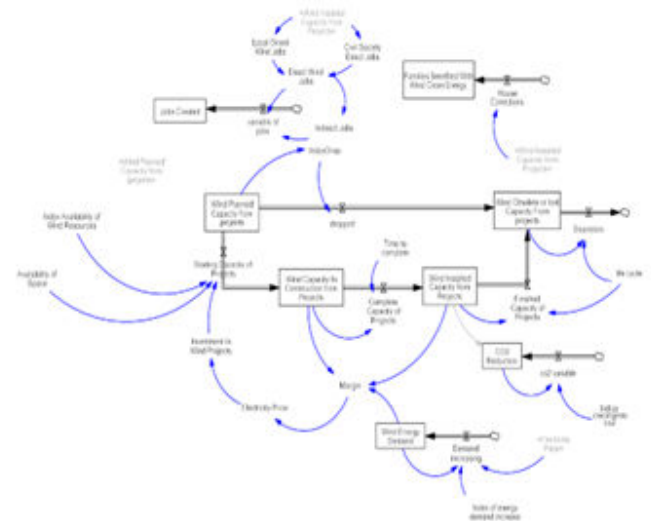


Fig. 4. General simulation model. Own Elaboration.

The interaction of the variables in the system can be seen as curves resulted of the simulation project. On a first view of the model is important to mention the principal relations between the variables.

Availability of resources, space and inversion are three requisites that allow planned capacity to be convert to capacity in construction on the simulation, and then to installed capacity. Installed capacity creation is the principal variable that allow the growing of jobs on the society, considering formal and informal jobs, related to the activities of the wind plant [16], [17], [18].

The correlation between the growth of installed wind power and the reduction in CO_2 emissions is clear. This is mainly due to the capacity of wind energy to substitute some of the fossil fuel consumption in Colombian thermal power plants. In the year 2020, CO_2 emissions from Colombia's electricity sector reached a total of 15.1 gigagrams of CO_2 [19].

There are other variables to consider, for example the availability of space. It is a serious matter of study as wind plants are projects that cover a large extension of land where different people and cultures live, although an economic consideration is raised for the use of space, it is worth asking about the real value of the land [20], [21].

On some of Camellias project documentation found it's interesting the relationship that Wayuu community has with land, as some of them perceive themselves displaced of their territories by the wind projects. Other see a great potential on the project but see on the investor of the project an opportunity for demanding social minimum conditions that are a duty of Colombian government, but this is all related to negotiation regarding the use of their territory for the project [22]. Fig. 5 presents the results obtained to the installed capacity of wind power for the Camelia project in La Guajira.

There are some indications in the literature that signpost that other productive activities can be carried out between the

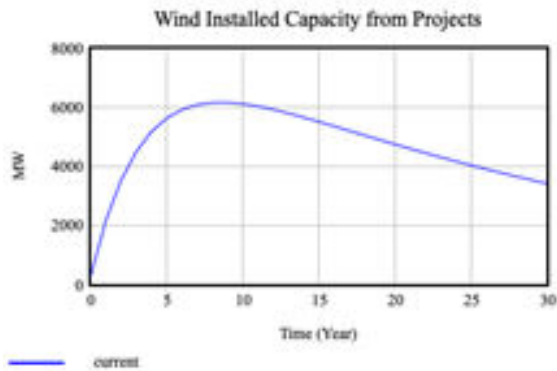


Fig. 5. Results of wind power capacity from Camelia Project for the simulation model. Own Elaboration.

spaces of one wind tower and another [23], [24], but today it may be due to technology and other security issues, the projects are planned as closed facilities, without the possibility of other productive activities [25]. In this sense, Fig. 6 presents the loss of wind power capacity.

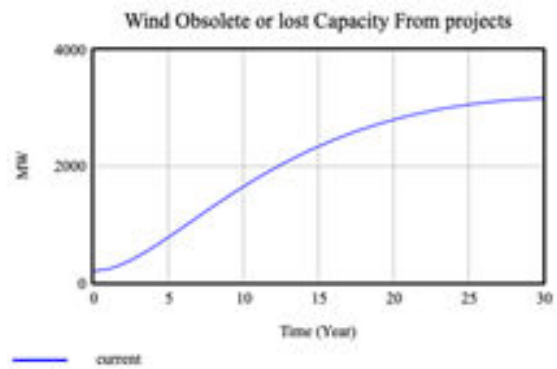


Fig. 6. Results for the loss of wind power capacity from the simulation model. Own Elaboration.

The findings of this study align with other authors who also support the notion that working through project management is essential to minimize the lost capacity of installed wind energy.

IV. CONCLUSIONS

If Camellias project wants to be a success for the investor and for society, Collaborative efforts are necessary to create a conducive environment for the successful development of wind energy projects. [26], [27], [28], [29].

This study showed some important insights around the necessity of not seen the benefits of projects to the society as a static block.

It is necessary to difference the importance and grade of impact of each factor to the different groups of stakeholders, as for example jobs created is more relevant for the local community, but installed capacity can be more important for the civil society that is not around influence of the project. Complex relationships between stakeholders can be seen on

future research in a holistic way using system dynamics simulation.

REFERENCES

- [1] United Nations, "The Paris Agreement," Denmark, 2015. Online. Available: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtsg_no=XXVII-7-
- [2] UPME, "Subastas," Jan. 01, 2022. <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/Subastas-largo-plazo/Paginas/Subastas-de-largo-plazo.aspx> (accessed Jun. 30, 2023).
- [3] SerColombia, "Proyectos de Energías Renovables 2023 - 2024: Oportunidades y Desafíos para su ejecución," 2023. <https://ser-colombia.org/estudios-y-documentos/> (accessed Jul. 19, 2023).
- [4] UPME, "Generación," Subastas de largo plazo, Jul. 01, 2023. <https://www1.upme.gov.co/siel/Pages/Seguimiento-proyectos-generacion.aspx> (accessed Jun. 30, 2023).
- [5] BNamericas, "BNamericas," Retrasos en transmisión elevarían precios de electricidad en Colombia, Jan. 01, 2022. <https://www.bnamericas.com/es/noticias/retrasos-en-transmision-elevarian-precios-de-electricidad-en-colombia> (accessed Jun. 30, 2023).
- [6] A. M. Esteves, D. Franks, and F. Vanclay, "Social impact assessment: the state of the art," *Impact Assessment and Project Appraisal*, vol. 30, no. 1, pp. 34–42, Mar. 2012, doi: 10.1080/14615517.2012.660356.
- [7] F. Squazzoni, W. Jager, and B. Edmonds, "Social Simulation in the Social Sciences," *Soc Sci Comput Rev*, vol. 32, no. 3, pp. 279–294, Jun. 2014, doi: 10.1177/0894439313512975.
- [8] L. Chinmoy, S. Iniyar, and R. Goic, "Modeling wind power investments, policies and social benefits for deregulated electricity market – A review," *Appl Energy*, vol. 242, pp. 364–377, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.088.
- [9] M. S. Nazir, N. Ali, M. Bilal, and H. M. N. Iqbal, "Potential environmental impacts of wind energy development: A global perspective," *Curr Opin Environ Sci Health*, vol. 13, pp. 85–90, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.coesh.2020.01.002.
- [10] J. K. Kaldellis, D. Apostolou, M. Kapsali, and E. Kondili, "Environmental and social footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart," *Renew Energy*, vol. 92, pp. 543–556, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.018.
- [11] M. Eftekhari Shahabad, A. Mostafaeipour, H. Hosseini Nasab, A. Sadegheih, and H. Ao Xuan, "A new model to investigate effects of subsidies for home solar power systems using system dynamics approach: A case study," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, p. 101706, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101706.
- [12] C. Jeon and J. Shin, "Long-term renewable energy technology valuation using system dynamics and Monte Carlo simulation: Photovoltaic technology case," *Energy*, vol. 66, pp. 447–457, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.050.
- [13] R. Maqbool and S. A. Akubo, "Solar energy for sustainability in Africa: The challenges of socio-economic factors and technical complexities," *Int J Energy Res*, vol. 46, no. 12, pp. 16336–16354, Oct. 2022, doi: 10.1002/er.8425.
- [14] T. Kuhlman and J. Farrington, "What is Sustainability?," *Sustainability*, vol. 2, no. 11, pp. 3436–3448, Nov. 2010, doi: 10.3390/su2113436.
- [15] Y. Guzmán-González, "Riesgos y peligros laborales en termoeléctricas," *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, vol. 52, no. 3, pp. 239–250, Jul. 2020, doi: 10.18273/revsal.v52n3-2020006.
- [16] S. Gonçalves, T. P. Rodrigues, and A. L. S. Chagas, "The impact of wind power on the Brazilian labor market," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 128, p. 109887, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109887.
- [17] L. Aldieri, J. Grafström, K. Sundström, and C. P. Vinci, "Wind Power and Job Creation," *Sustainability*, vol. 12, no. 1, p. 45, Dec. 2019, doi: 10.3390/su12010045.
- [18] E. Llera, S. Scarpellini, A. Aranda, and I. Zabalza, "Forecasting job creation from renewable energy deployment through a value-chain approach," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 262–271, May 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.053.
- [19] DANE, "Cuenta Ambiental y Económica de Flujos de Materiales – Emisiones al Aire," 2022. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuenta-ambiental-economica-flujos-materiales/bl-ct-emisiones-al-aire-pyc-combustibles2019-2020p.pdf (accessed Jul. 19, 2023).

- [20] R. Froese and J. Schilling, "The Nexus of Climate Change, Land Use, and Conflicts," *Curr Clim Change Rep*, vol. 5, no. 1, pp. 24–35, Mar. 2019, doi: 10.1007/s40641-019-00122-1.
- [21] T. Egli, J. Bolliger, and F. Kienast, "Evaluating ecosystem service trade-offs with wind electricity production in Switzerland," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 863–875, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.074.
- [22] CELSIA, "Consultas Previas," 2022. Accessed: Jul. 01, 2023. Online. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=DsG0S1rkLcI>
- [23] Z. Tasneem et al., "An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges," *Developments in the Built Environment*, vol. 4, p. 100033, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.dibe.2020.100033.
- [24] P. Morano, F. Tajani, and M. Locurcio, "GIS application and econometric analysis for the verification of the financial feasibility of roof-top wind turbines in the city of Bari (Italy)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 999–1010, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.12.005.
- [25] Corpoguajira, "AUTO N° 177 de 2022," 2022. <https://onx.la/b49fa> (accessed Jul. 03, 2023).
- [26] S. Agterbosch, P. Glasbergen, and W. J. V. Vermeulen, "Social barriers in wind power implementation in The Netherlands: Perceptions of wind power entrepreneurs and local civil servants of institutional and social conditions in realizing wind power projects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 6, pp. 1025–1055, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.10.004.
- [27] B. Bayer, "Experience with auctions for wind power in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2644–2658, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.070.
- [28] M.M. Herrera, I. Dyner, and F. Cosenz, "Benefits from energy policy synchronisation of Brazil's North-Northeast interconnection," *Renewable Energy*, 2020, 162, 427–437, doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.056.
- [29] M.M. Herrera, I. Dyner, and F. Cosenz, "Assessing the effect of transmission constraints on wind power expansion in northeast Brazil," *Utilities Policy*, 59, 2019, 100924, doi.org/10.1016/j.jup.2019.05.010.

Prototype of Electric Vehicle Drivetrain Emulation for Energy Regeneration Testing Using an Induction Machine

Julian David Ontibon Velasquez¹, Nelson Leonardo Diaz Aldana² and Javier Antonio Guacaneme Moreno³

Abstract—This proposal is focused on the development of a prototype that simulates the drivetrain of an electric vehicle. The main objective is to replace the internal combustion engine of a conventional vehicle with an electromechanical system. The prototype includes a bidirectional direct current power source, a power controller, and an asynchronous electric machine. The choice of the asynchronous machine is based on its ability to provide the necessary starting torque to move the vehicle from a standstill. The control of the induction machine is performed through a three-phase inverter, controlled by a real-time simulation platform. Additionally, a control module is used to set a fixed mechanical load on the machine. The connection between the control module and the simulation platform is established through fiber optic channels to ensure secure and reliable data transmission. Tests were conducted to evaluate the performance of the prototype under different operating conditions, including tests simulating urban conditions and steep terrains. A design methodology for electric vehicles has been developed, encompassing component selection, control system integration, and energy efficiency analysis. Although the prototype was developed with limited resources, the research objectives were successfully achieved. However, opportunities for further improvement and optimization of the prototype's performance are acknowledged with increased financial support and additional resources.

Index Terms—Electric vehicle, prototype, power drive, asynchronous electric machine, energy efficiency.

I. INTRODUCTION

CURRENTLY, the world is facing a global environmental crisis due to high pollution and emissions from internal combustion engine vehicles, resulting in an increase in the planet's temperature. In Bogotá, 60% of emissions come from mobile sources such as cars, buses, and trucks, with 80% of PM2.5 particles being generated by vehicles [1]. One proposed solution is to transition to more environmentally friendly vehicles, such as electric, hybrid, or hydrogen fuel cell vehicles, as these have experienced a 262% growth in sales in Colombia during the first four months of 2022 [2]. Old vehicles in Colombia pose safety and pollution problems [3], but some can be adapted to new technologies. When converting conventional vehicles to electric, it is essential to

adjust the braking system to recover energy and reduce waste [4].

This consideration is crucial since internal combustion engines have a high percentage of losses compared to a more efficient electric system [4].

One of the most direct and effective measures to reduce greenhouse gas emissions is the conversion of internal combustion engine vehicles to electric vehicles (The basic structure of the powertrain components of an electric vehicle is described in section II), replacing the conventional powertrain with an electric one. This transition represents a significant change in the way vehicles operate and can have a substantial impact on reducing CO₂ emissions. Let's take the example of converting a vehicle with an approximate weight of one ton [5]. According to a study, these vehicles travel between 75,000 and 135,000 kilometers over a 5-year period [6]. This means that, for this particular category, a single converted vehicle would avoid emitting between 8.7 tons and 15.66 tons of CO₂ during that timeframe (According to combustion data acquired by a specialized automobile magazine [7]). These figures highlight the positive impact that the conversion of internal combustion engine vehicles to electric can have in terms of emission reduction. This measure not only has environmental benefits by decreasing greenhouse gas emissions but also contributes to improving air quality by reducing local pollution. Furthermore, transitioning to electric vehicles reduces dependency on fossil fuels and promotes the adoption of renewable energy in the transportation sector.

This document aims to present a prototype that emulates the powertrain of an electric vehicle to replace the internal combustion engine found in traditional vehicles. To achieve this purpose, a bidirectional source of direct current and an asynchronous machine acting as a motor and generator are employed, manipulated by a power controller that efficiently manages both operating modes, the aforementioned is described in section III. The integration of these components allows emulating the electric propulsion system and conducting tests to investigate the performance, efficiency, and environmental and economic advantages of electric vehicles. In the experimental platform, a three-phase inverter controlled by pulsation is used to manipulate the induction machine, ensuring optimal and stable operation. Furthermore, the connection between the pendulum machine control module, responsible for emulating the mechanical conditions of the system, and the real-time simulation platform Opal RT is carried out through optical fiber channels, ensuring a secure and reliable transmission of

This work was partially supported by Minciencias with project Programa de Investigación en Tecnologías Emergentes para Microrredes Eléctricas Inteligentes con alta Penetración de Energías renovables, contract 80740542—2020

Authors are with Universidad Distrital Francisco José de Caldas

¹ jdontibonv@udistrital.edu.co

² jaguacanemem@udistrital.edu.co

³ nldiaz@udistrital.edu.co

digital signals. Additionally, direct tests are performed on the prototype, including the implementation of the FTP75 standard and tests under challenging conditions to evaluate the behavior and performance of the system, described in section IV

II. DESCRIPTION OF THE ELECTRIC VEHICLE DRIVETRAIN

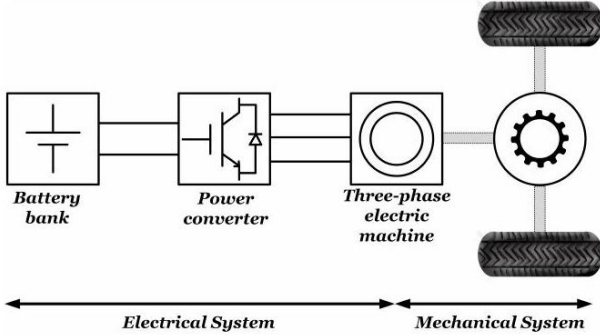


Fig. 1. Structure of a single motor-driven electric vehicle

The basic structure of the electric vehicle drivetrain consists of three main elements, which we can observe in Figure 1: the electric machine, the power drive, and a rechargeable power source. The electric machine is crucial for generating motion, acting as both a motor for propulsion and a generator for energy recovery. The power drive controls the flow of energy between the electric machine and the power source, converting current and enabling recharging. The rechargeable power source supplies the necessary energy, typically composed of rechargeable batteries that can be replenished from an external source or through regenerative braking. In this emulation, a bidirectional DC power source is used.

III. GENERAL PROTOTYPE

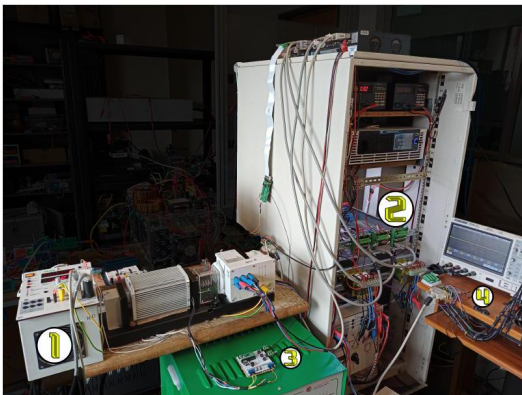


Fig. 2. Implemented experimental platform

In our prototype (Show in Figure 2), we have emulated the power source or batteries of the electric vehicle with a bidirectional direct current (DC) source. This source allows us to simulate energy supply and recovery, thus mimicking the behavior of a real electric vehicle. In addition to the

power source, a power controller is required to manage the energy from the source and apply it appropriately to the rotating electric machine. It is important to note that there is no direct reference to a specific motor, as this prototype will operate both as a propulsion motor and as a generator for energy recovery. This means that the power controller must efficiently handle both operating modes. The integration of these components in the prototype will enable the emulation of the electric vehicle drivetrain and facilitate testing and analysis in a controlled environment.

IV. GENERAL PROTOTYPE

The platform represents the electrical and mechanical scheme shown in Figure 3. This system emulates the conditions experienced by an electric vehicle using a pendulum machine that imposes a variable load, simulating braking situations and changes in terrain. The main motor of the electric vehicle in this specific case is a 0.25 kW induction machine capable of generating up to 1.4 Nm of torque. About this particular machine, vacuum and blocked rotor tests were carried out [8] to evaluate the power losses that this machine exhibits.

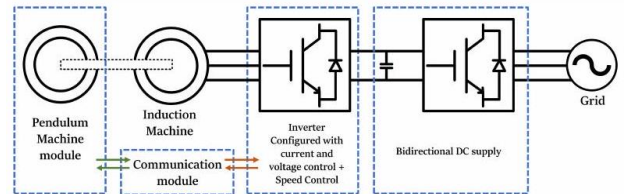


Fig. 3. General blocks of the prototype

Additionally, there is a simulation model based on the state-space equations that describe the behavior of the induction machine in Matlab Simulink [9], using the parameters obtained in an article that employs the same machine [10]. To control this induction machine, a power drive is used, consisting of an inverter with six IGBTs. These components are controlled by models configured in the Opal RT platform, where control and current loops are implemented, as shown in Figure 4. Finally, there is the bidirectional power source connected to the three-phase grid, which, under certain operating conditions, can return energy to the electric grid.

The system employs hierarchical control loops to manage the load of the inverter [11], i.e., the induction machine. These control loops can reference the voltage/frequency provided by a speed controller, eliminating the slip inherent to the nature of the machine and achieving more precise control in the planned tests.

V. TEST AND RESULTS

A test is conducted on the platform using the speed and torque profile of the FTP75 driving cycle [12], which we can observe in Figure 5, without speed control. In this configuration, the system's slip can be observed, especially at low speeds when the system is transitioning from a stationary state.

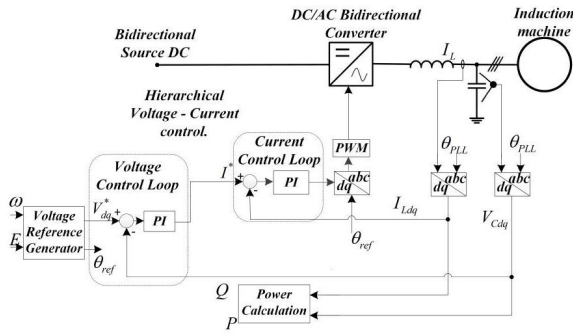


Fig. 4. Control scheme of the power drive

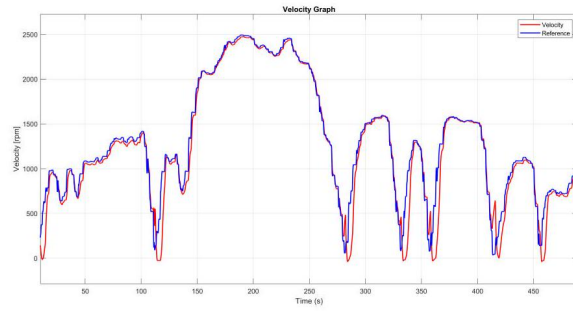


Fig. 5. Speed under urban driving profile FTP75

Regarding the electrical variables (Figure 6) at the electrical connection point of the machine, it is observed that the active power undergoes significant changes due to the system's dynamics, even reaching negative values. This behavior is a result of the regenerative braking of the system, which occurs due to the inertia present in the system. On several occasions, the machine transitions from operating as a motor to operating as a generator, and vice versa, causing this change in active power. As for the reactive power, it is observed to have a positive value for speeds below 1800 RPM, while for higher speeds, its magnitude is negative.

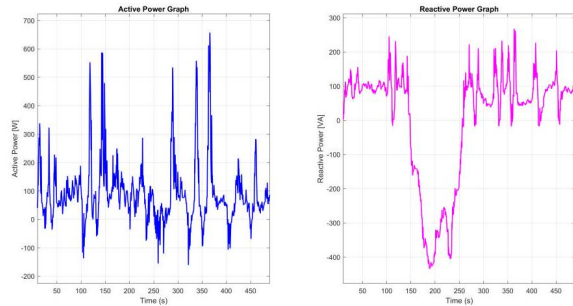


Fig. 6. Power analysis under urban driving profile FTP75

A test was conducted using a speed profile developed by the authors, which we can observe in Figure 7, which takes into account smoother speed changes under different torque conditions. This test emulates the behavior of ascending or descending slopes, where the machine's mode change is

significantly noticeable, which we can observe in Figure 8. Furthermore, a speed control was applied that eliminated machine slip under various speed and torque conditions, as long as abrupt changes in these conditions did not occur.

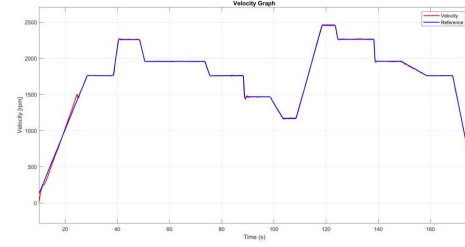


Fig. 7. Speed under different mechanical torque conditions, with speed control - Topology test with different slope angles, ONTIBON test

The implementation of speed control in the system introduces a new dynamic in its behavior, which is reflected in the active power graph with the presence of some additional oscillations. In this graph, the negative zone can also be clearly observed, where the electrical machine returns energy to the system through regeneration, especially when descending a slope. The reactive power graph shows the same behavior described above.

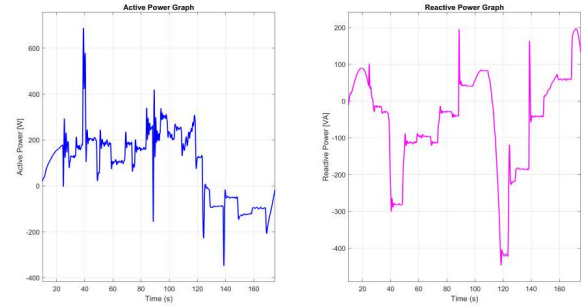


Fig. 8. Active and reactive power of the three-phase point - Topology test with different slope angles, ONTIBON test

The most interesting observation from Table I is the additional percentage of distance that a vehicle can achieve under these profiles. For example, in an urban driving cycle, where energy regeneration relies mainly on braking, the configuration presented in this thesis demonstrates the ability to increase the range by approximately 5% with a standard load.

TABLE I
ENERGY RESULTS OF DRIVING CYCLES

TEST	Torque	Control	Energy	Extra percentage
FTP75	No	Yes	10.2499	0
FTP75	Yes	Yes	9.9467	5.5066
FTP75	No	No	10.2268	0
FTP75	Yes	No	12.2264	4.8135
ONTIBON	No	Yes	4.2984	0
ONTIBON	Yes	Yes	4.4665	23.073
ONTIBON	No	No	4.2317	0
ONTIBON	Yes	No	4.2309	23.8

On the other hand, when analyzing the highway driving cycle, which includes different slopes, the same configuration

shows a significant increase of approximately 23% in the range. These results highlight the efficiency and improved performance that can be achieved with the proposed configuration.

VI. CONCLUSIONS

The development of an experimental platform to simulate the drivetrain of electric vehicles has been a significant milestone in evaluating the performance and efficiency of propulsion systems. By integrating key components such as a power source, power controller, induction machine, and mechanical load, the operating conditions were recreated, providing valuable insights into the system's behavior under different speed and load situations, including energy regeneration during braking and inertia. These results lay the foundation for future improvements in the design and efficiency of electric vehicles, particularly in the implementation of energy regeneration systems that contribute to emission reduction and improved range.

REFERENCES

- [1] A. Farrow, K. Miller, J. Rolle, T. Céspedes, and A. Anhaeuser, "Contaminación del aire por el tráfico vehicular."
- [2] Andi, "Boletín vehículos nuevos abril 2022."
- [3] E. A. económico independiente, "El sector de vehículos en Colombia: Características y propuestas de mejora a su régimen impositivo económico-noviembre de 2016."
- [4] F. Economy, "A donde va la energía," 2022.
- [5] pruebaderuta.com, "Segmentos en el automóvil."
- [6] J. Muñoz, "¿qué kilometraje debería tener un carro anualmente?," 1 2023.
- [7] km77, "km77 - marcas de coches en el mercado español," 2023.
- [8] A. Bosh-tous, "Comparación de métodos experimentales para obtener los parámetros eléctricos de un motor de inducción," Artículo Revista de Sistemas Experimentales Septiembre, vol. 3, pp. 8-17, 2016.
- [9] P. B. Deb and S. Sarkar, "Dynamic model analysis of three phase induction motor using matlab/simulink," International Journal of Scientific and Engineering Research, vol. 7, 2016.
- [10] I. of Electrical and E. Engineers, "Transient operation modeling of induction machine," 2015.
- [11] K. Puentes and S. Silva, "Diseño de un esquema de sincronización e interconexión de dos inversores trifásicos operando como unidades formadoras," 2020.
- [12] S. Baek, J. Cho, K. Kim, S. Ahn, C.-L. Myung, and S. Park, "Effect of the metal-foam gasoline particulate filter (gpf) on the vehicle performance in a turbocharged gasoline direct injection vehicle over ftp-75," International Journal of Automotive Technology, vol. 21, pp. 1139-1147, 2020.

Desigualdades en los resultados de las pruebas Saber Pro ¿Las afectó el COVID?

Sonia E. Monroy
Dept. Ing. Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia
semonroyv@unal.edu.co

Carlos E. Moreno
Dept. Ing. Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia
cemorenoma@unal.edu.co

Lina M. Prieto
Dept. Ing. Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia
liprietov@unal.edu.co

Gabriel S. Riascos
Dept. Ing. Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia
griascos@unal.edu.co

Jarol S. Linares
Dept. Ing. Sistemas e Industrial
Universidad Nacional de Colombia
jslinaresa@unal.edu.co

Hernando Diaz
Dept. Ing. Eléctrica y Electrónica
Universidad Nacional de Colombia
hdiazmo@unal.edu.co

Resumen—Este artículo examina el impacto de la pandemia de COVID-19 en el aprendizaje de estudiantes de educación superior en Colombia. Se analizan factores socioeconómicos, personales y familiares que influyeron en las desigualdades resultantes. Utilizando datos de la prueba Saber Pro entre 2017 y 2021, se aplicó un modelo de diferencias en diferencias para estimar el impacto. Se analizó el impacto sobre puntajes, percentiles y quintiles, controlando por género, estrato socio económico, educación de la madre y exposición. Los resultados indican que, a pesar del pequeño efecto neto de la pandemia en la población en general, hubo un efecto indeseable desde el punto de vista de equidad. Los logros mejoraron para estudiantes con madres profesionales o con posgrados, pero disminuyeron para aquellos con madres menos educadas. Cuando se considera el género, las mujeres experimentaron una reducción de casi un punto en el percentil, en comparación con menos de 0.6 puntos para los hombres. Este estudio ofrece evidencia para apoyar la formulación de políticas públicas para abordar estos desafíos.

Index Terms—Desigualdades en educación, pandemia COVID-19, Saber Pro, evaluación de impacto

I. INTRODUCCIÓN

La noticia inicial sobre el surgimiento del virus SARS-CoV-2 data de finales de 2019 y está vinculada a los acontecimientos en Wuhan, China. La propagación del virus abarcó rápidamente China y se extendió globalmente, conduciendo a la designación de pandemia por parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 11 de marzo de 2020. En respuesta, Colombia implementó medidas para contrarrestar los impactos de la epidemia, especialmente en el ámbito de la salud pública.

Desde el 15 de marzo de 2020, varias universidades en Colombia suspendieron las clases presenciales, pasando a impartir educación de forma remota. Se impuso un confinamiento generalizado a nivel nacional, generando grandes desafíos, en particular para estudiantes de bajos recursos. Durante más de un año, las clases presenciales se mantuvieron suspendidas en todos los niveles, y la reintegración progresiva comenzó con instituciones no oficiales. Las escuelas oficiales fueron las últimas en retomar la enseñanza presencial.

La formulación de políticas basadas en evidencia exige la evaluación del impacto de factores que intensifican las desigualdades educativas. Esto involucra medir brechas de aprendizaje entre grupos diversos. En este sentido, incluso desde antes de la pandemia, se estableció una fuerte correlación entre los resultados en la prueba SAT en Estados Unidos y antecedentes socioeconómicos [1], destacando la necesidad de mitigar el “sesgo” étnico y de clase en dicha prueba

[2]. Así mismo, [3] encontraron evidencia para el impacto directo de los ingresos familiares y el indirecto mediado por la educación de los padres en el desempeño en la prueba SAT.

Se esperaba que las restricciones de la pandemia afectaran principalmente a estudiantes con bajos ingresos, limitados para aprovechar recursos virtuales. Esta inquietud se expresó en Países Bajos [4], Canadá [5] y Estados Unidos [6], [7], entre otros contextos. Desde entonces, varias investigaciones han evaluado el impacto de los cierres escolares, evidenciando efectos negativos, especialmente en grupos vulnerables [8].

[9] observaron desigualdades significativas en el aprendizaje de estudiantes de primaria en Países Bajos debido a la pandemia, ampliando las disparidades previas. [10] hallaron declives de 5 a 10 puntos porcentuales en pruebas de matemáticas para estudiantes estadounidenses de grados 3 a 8 en 2020, con diferencias demográficas que perjudicaron a los más vulnerables. [11] encontraron pérdidas notables en estudiantes belgas, siendo más marcadas en aquellos desfavorecidos.

En Colombia, [12] utilizaron los resultados de la prueba Saber 11 para evaluar la desigualdad en el aprendizaje durante la pandemia, considerando factores individuales, de los hogares y de los centros educativos. En el caso de los hogares, se incluyó el acceso a Internet y computador y la educación de los padres, esta última también considerada por [13], [3] y [11], entre otros estudios. Los resultados para el caso colombiano sugieren que la desigualdad aumentó en todas las áreas excepto el género. También en Colombia, [14] obtuvieron resultados similares con datos de la prueba Saber 11 entre 2017 y 2020.

La literatura demuestra que la pandemia afectó el aprendizaje de estudiantes de educación media, con impactos diferenciados por factores socioeconómicos, género, región e institución. Sin embargo, contextos como Dinamarca [15] y Suecia [16] no reflejaron efectos significativos en el aprendizaje estudiantil.

En consecuencia, esta investigación busca entender cómo factores personales, familiares y socioeconómicos influyeron en la afectación educativa durante la pandemia en Colombia. Se adopta un enfoque de inferencia causal a partir de datos observacionales, centrados en la prueba Saber Pro, ya que no existen equivalentes empíricos para el contexto colombiano. A continuación se describen la muestra, los métodos y el modelo causal, seguido por los resultados y su discusión frente a la literatura de referencia. El artículo termina con las conclusiones y recomendaciones.

Este estudio contó con la financiación de la Facultad de Ingeniería — Universidad Nacional

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Describimos los medios usados para hacer las estimaciones así como la metodología seguida para lograr los resultados. En primer lugar describimos los datos y, a continuación, la metodología.

II-A. Datos

Las pruebas Saber Pro son exámenes estandarizados, aplicados en Colombia por el Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación — ICFES, que buscan evaluar las competencias y habilidades de los estudiantes que están finalizando su programa académico universitario. La prueba evalúa cinco competencias generales: razonamiento cuantitativo, lectura crítica, comunicación escrita, inglés y competencias ciudadanas. También evalúa temáticas específicas de acuerdo con el área de formación de los distintos programas. En este estudio solo consideramos las competencias generales. El ICFES ha hecho públicos los datos anonimizados de las diferentes convocatorias. Estos datos fueron combinados en una base de datos global.

El estudio se basó exclusivamente, en la información suministrada por el ICFES, según se describió anteriormente. Para mantener la homogeneidad de la base de datos, se limitó el estudio al período 2017–2021. Consideramos un período **prepandemia** que incluye todos los exámenes presentados antes de 2020 y **pandemia** los que presentaron estudiantes que debieron afrontar el confinamiento y clases remotas debido a la epidemia COVID-19.

II-B. Metodología

El primer paso de la metodología consistió en proponer un modelo causal. A partir de éste, se caracterizaron los distintos grupos y se hicieron las estimaciones de efectos usando modelos estadísticos.

II-B1. Modelo causal: Para evaluar el impacto del confinamiento se propone un análisis causal donde asimilamos la pandemia a un **experimento natural** y la población se divide en dos grupos: uno de **tratamiento** (los que fueron sometidos al confinamiento) y otro de **control**. Puesto que la pandemia no está asociada con ninguna característica de los participantes, es válido suponer que la selección de uno u otro fue completamente al azar, como se requiere para un experimento aleatorizado.

Se propone un modelo causal basado en grafo acíclico dirigido (DAG) que aparece en la figura 1. Nótese que la pandemia, que será considerada como el **tratamiento** en el experimento, es la variable cuyo efecto será evaluado.

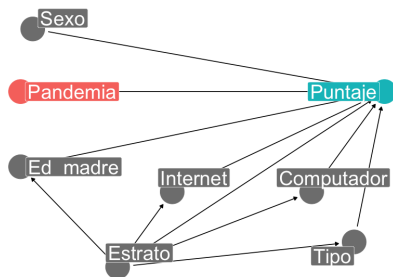


Figura 1. DAG del modelo causal

La variable **Resultados** en el gráfico se refiere a los puntajes globales o del componente de interés o de los percentiles correspondientes o de una discretización del percentil en quintiles.

II-B2. Descripción de los datos: La base de datos contiene 1.236.396 registros, de los cuales el 60 % (743.072) corresponde a prepandemia y 40 % (492.928) a pandemia. Con base en el DAG propuesto, se definió una variable denominada **tratamiento**, de la siguiente manera:

$$\text{tratamiento} = \begin{cases} 0 & \text{año} < 2020 \\ 1 & \text{año} \geq 2020 \end{cases}$$

Se caracterizó la población según las variables que identifican al individuo (género), a la familia (estrato socioeconómico, educación de la madre), a los medios a su disposición (internet, computador) y a la institución educativa (tipo y carácter de la institución). Se elaboraron estadísticas descriptivas y se compararon las características del grupo de tratamiento con el grupo de control. El estrato es una aproximación a la diferencia socioeconómica jerarquizada, que clasifica las viviendas y/o los predios en 6 grupos.

Se analizaron los resultados de los puntajes globales de los individuos y de los puntajes en cada uno de los componentes de la prueba. También se estudiaron los resultados de los percentiles globales y por prueba. Para esta última variable (percentil), se definieron categorías discretas en forma de quintiles, con el fin de comparar el desempeño de los diferentes grupos económicos (estrato). Esto permitió analizar las desigualdades en los resultados de una forma más específica, no simplemente comparando valores promedios de los quintiles.

II-B3. Estadística descriptiva: La participación de hombres y mujeres en cada uno de los estratos no es igual. El 60 % de los estudiantes son mujeres, pero esa proporción varía con el estrato: en el estrato 1 las mujeres representan el 63 % y en el estrato 6, sólo representan el 53 %.

En la figura 2 se presenta la distribución del nivel educativo de la madre, según el estrato. El ancho de las barras es proporcional al tamaño de la población y la altura de los bloques que componen el mosaico es proporcional a la fracción de estudiantes cuyas madres alcanzaron el nivel educativo indicado. Nótese que el 84 % de esta población vive en estratos 1, 2 y 3; 10 % habita en estrato 4 y 6 % en estratos 5 y 6. Es evidente el mayor nivel educativo a medida que sube el estrato.

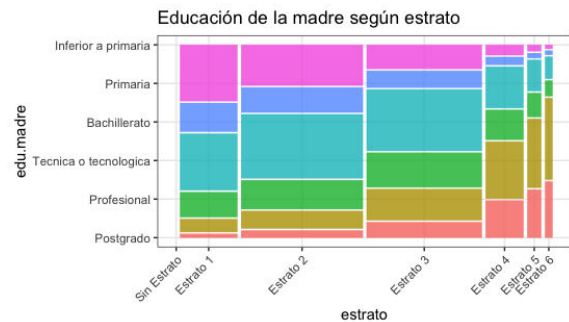


Figura 2. Nivel educativo de la madre, por estrato

La figura 3 muestra las distribuciones de probabilidades de los puntajes por estrato. La mayor parte de los puntajes se encuentran entre 100 y 200. Se observa claramente que a medida que sube el estrato los puntajes son más altos. El 75 % de los puntajes en estrato 6 son superiores a los del 75 % del estrato 1.

II-B4. Estimación: Usamos un modelo de diferencias en diferencias para estimar los efectos de la pandemia. La estimación de este efecto se implementó mediante un modelo de regresión lineal

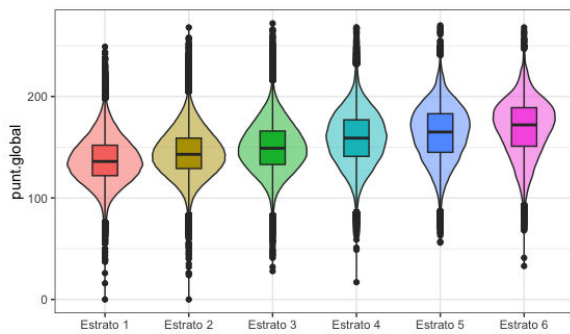


Figura 3. Distribución de puntaje global por estrato

multivariable para las variables numéricas (puntaje —de 0 a 300, percentil) de la forma:

$$\begin{aligned} \text{variable}_i = & \alpha + \beta \text{ estrato}_i + \gamma \text{ tratamiento} + \\ & + \delta (\text{estrato}_i \times \text{tratamiento}) + \\ & + \zeta \text{ controles}_i + \epsilon \end{aligned}$$

donde variable_i es el resultado cuya variación queremos analizar y puede ser una de éstas: puntaje_i —el puntaje absoluto obtenido por el estudiante i en un área determinada, percentil_i —el percentil correspondiente; estrato_i es el estrato socioeconómico correspondiente a su familia y tratamiento es una variable binaria que describe si la prueba fue presentada después de haber estado sometido al cierre debido al confinamiento; controles_i son las otras características del individuo, cuyo efecto queremos controlar.

Para los quintiles usamos una variable quintil_i —el quintil alcanzado en el área y un modelo de **regresión ordinal logística**, basado en la suposición de **riesgos proporcionales** [17], la cual parece perfectamente justificada puesto que la variable de resultado proviene de la discretización de los percentiles (los cuales obran en ese caso como variables latentes).

III. RESULTADOS

El análisis de los resultados se dividió en tres tipos, dependiendo de la variable utilizada para hacer las comparaciones. Como se describió antes, se usaron los puntajes, los percentiles y quintiles para hacer los diferentes estudios. Empezaremos el análisis con los quintiles.

III-A. Quintiles

Los resultados de los exámenes Saber Pro evidencian la gran desigualdad existente en la calidad de la educación recibida por los estudiantes de diferentes estratos socio-económicos. La comparación de los datos de percentiles para los estudiantes de diferentes estratos muestra que, por ejemplo, sólo cerca del 10 % de los estudiantes de estrato 1 logra estar en el quintil más alto, de 80 a 100 %, mientras que en el estrato 6, más del 60 % lo logra. En cambio, 27 % del estrato 1 está en el quintil más bajo, algo que menos del 5 % de los de estrato 6 obtiene. Los resultados están en la figura 4. Aunque las comparaciones entre estratos son más dramáticas entre el estrato 1 y el 6, se debe notar que la desigualdad entre los estratos 4, 5 y 6 no es, de ninguna manera, tan dramática. Observando la figura 4 se puede notar que la desigualdad más significativa se presenta entre el conglomerado de los estratos 4, 5 y 6 comparadas con el grupo de estratos 1, 2 y 3. Esta diferencia podría caracterizarse como una

especie de “Efecto de *gueto*” al cual están sometidos los estratos que carecen de recursos para procurarse una mejor educación.

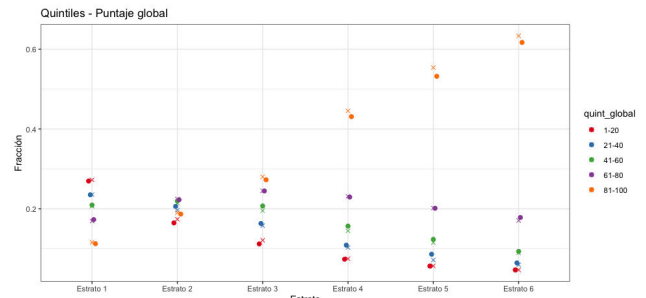


Figura 4. Resultados Saber Pro, por estratos. Puntos sólidos son datos previos al inicio de la pandemia y las $\times$ son posteriores.

La figura 4 también permite observar que los efectos de la pandemia son significativos, pero, comparados con la magnitud de las desigualdades evidentes entre estratos, parecen insignificantes. Las probabilidades de pertenecer al primero y al último quintil presentan una mayor variación entre los estratos y su comportamiento es complementario. Cuando crece la probabilidad de uno disminuye la del otro. Lo más preocupante de los resultados es el hecho de que a medida que sube el estrato crece la probabilidad de pertenecer al quintil 80–100, prácticamente en forma proporcional reforzando la idea, varias veces expuesta (ver, por ejemplo [3] o [1]) de que este tipo de pruebas constituye más bien un diagnóstico de las condiciones socio económicas de los estudiantes.

El efecto del confinamiento debido a la pandemia sobre la distribución en quintiles fue pequeño en todos los casos y todos los estratos, comparados con la magnitud de las diferencias por estrato. Sin embargo, el crecimiento más notable se presenta en la proporción de resultados en el quintil 80–100, precisamente en los estratos 4, 5 y 6.

Uno de los factores que más afecta la desigualdad en la distribución de percentiles de los resultados del examen es la calificación de la prueba de inglés. Este es el componente donde se presentan las mayores desigualdades. Los resultados de esta prueba se resumen en la figura 5. Se nota que el patrón descrito antes para el puntaje global se repite aquí, en forma acentuada. Las desigualdades entre estratos son aún mayores. 80 % de las personas de estrato 6 pertenecen al quintil 80–100; menos del 10 % del estrato 1, lo logran. Las otras componentes del examen tienen comportamientos similares pero con menores diferencias.

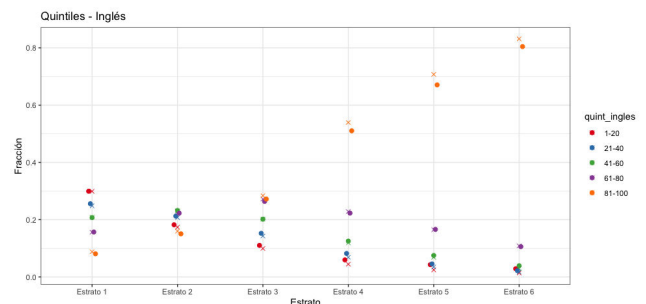


Figura 5. Prueba de inglés — Saber Pro, por estratos. Puntos sólidos son datos previos al inicio de la pandemia y las $\times$ son posteriores.

En general, a nivel de toda la población que presentó la prueba

Saber Pro, el efecto de la pandemia parece ser positivo desde el punto de vista de los quintiles. Esto se puede evidenciar en la figura 6 la cual muestra que, tras la pandemia, la composición por quintiles es menos heterogénea que antes, pues la fracción de personas en el quintil 1–20 se redujo y la de los quintiles 40–60, 60–80 y 80–100 aumentó. Esto produjo una distribución con menos dispersión, lo cual parece positivo. El problema es que esta reducción no fue igual en todos los estratos. Cuando se controla por estrato, se comprueba que las desigualdades están acentuadas.

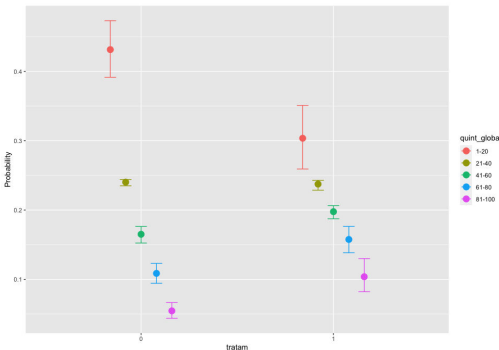


Figura 6. Efecto de pandemia sobre quintiles

III-B. Puntajes

Usando el modelo se puede observar que el efecto neto sobre el puntaje del total de la población es insignificante. Los puntajes promedios antes y después de la pandemia difieren por menos de 0.3 puntos medidos con respecto a un promedio de 161 puntos. Y además los intervalos creíbles se traslapan, como se evidencia en la figura 7. Nótese que este efecto es 16 veces menor que la diferencia de puntaje promedio entre hombres y mujeres (cerca de).

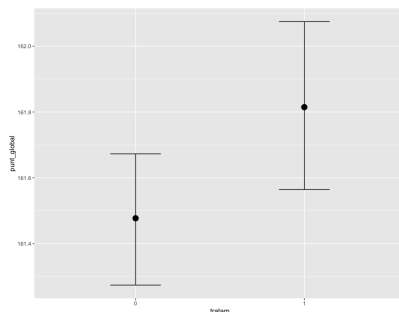


Figura 7. Efecto de pandemia sobre puntajes

Surge la pregunta de cómo se afectan estos impactos por otras variables como la educación de la madre. En la figura 8 se puede observar que, aunque el efecto neto de la pandemia a nivel de toda la población es muy pequeño, sí tiene un efecto contrario a lo deseado desde el punto de vista de equidad puesto que mejoró los resultados de los estudiantes cuya madre es profesional o tiene posgrado y disminuyó los resultados de aquellos cuya madre tiene menor nivel educativo. Hay que anotar que en el caso de madre que no completó la primaria el efecto de la pandemia sobre sus hijos fue superior a 5 puntos, en promedio.

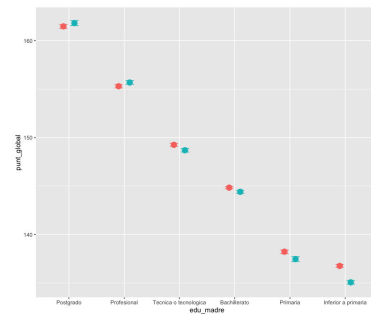


Figura 8. Efecto sobre puntajes, diferenciado según educación de la madre.

III-C. Percentiles

En este caso, estudiamos el efecto que, sobre el percentil logrado en la calificación global, tuvo la pandemia, controlando por educación de la madre y por género. La figura 9 muestra lo que un contraste de condiciones pre y pospandemia predice respecto al percentil promedio, cuando se controla por el nivel educativo alcanzado por la madre.

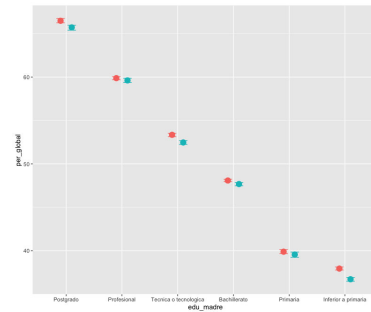


Figura 9. Efecto sobre percentiles, diferenciado según educación de la madre.

Como se puede observar en la figura 9, el percentil promedio para todos los grupos se vio reducido como efecto de la pandemia. Sin embargo, estas reducciones no son uniformes. La baja en el percentil de los estudiantes cuya madre no logró terminar primaria es más de dos puntos de percentil, comparada con los demás donde la reducción no supera un punto.

Una vez más, es preciso notar que, aunque el impacto de la pandemia es significativo, se ve opacado por las grandes diferencias sistémicas entre los diferentes grupos. Por ejemplo, se puede observar que existe una brecha bastante grande en los percentiles de estudiantes cuya madre no logró graduarse de bachiller y todos los demás. Esta brecha es de casi 10 puntos con las de quienes sí fueron bachiilleres y de casi 40 puntos entre las que tienen posgrado y las que no terminaron la primaria.

El contraste mayor entre los percentiles pre y pos-pandemia se produce cuando controlamos por género. como se ilustra en la figura 10. Se puede observar que entre las mujeres se redujo el percentil logrado en la prueba en casi un punto, mientras entre los hombres la reducción fue inferior a 0.6 puntos. Esto, sumado a la notable diferencia promedio en percentiles entre los dos grupos (que es de aproximadamente 5 puntos porcentuales) implica que la pandemia amplió la diferencia existente en el resultado de los dos sexos (a casi 5.5 puntos).

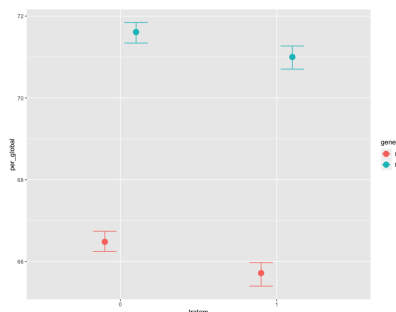


Figura 10. Efecto sobre percentiles, diferenciado por género.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados muestran un escenario post-pandemia aparentemente diferente del observado en [11] y [8], en donde los quintiles de los estudiantes estarían mejor distribuidos en la población tras la pandemia, encontrándose más cerca uno de otro. Posiblemente, la educación de los padres y el poder adquisitivo del hogar o del estudiante podrían explicar estas diferencias, como lo infieren [5] en su estudio, ya que, durante el período de confinamiento, los padres con un nivel educativo más alto podían suplir el rol de las instituciones educativas mientras sus hijos se encontraban en casa y complementar de una mejor manera su educación a comparación de aquellos que no tenían esa misma formación.

A diferencia de los resultados de [12] y [14] para el caso de la prueba Saber 11 en educación media, el efecto neto de la pandemia a nivel de toda la población es pequeño en nuestro estudio. No obstante, de forma similar a lo que [3], [11] y [13] habían tenido en cuenta previamente, los resultados sugieren que existe un efecto de la educación de los padres que es afectado a su vez por la pandemia: de una parte, mejorando el desempeño para los estudiantes cuya madre es profesional o tiene posgrado, y de otra, disminuyéndolo para aquellos cuya madre tiene menor nivel educativo.

La figura 4 también muestra que los estudiantes pertenecientes a lo estratos más altos obtuvieron un mejor desempeño en el puntaje global; además, sus padres tenían un nivel educativo más alto, lo cual podría conllevar a que estas familias tuvieran un mayor poder adquisitivo que les habría facilitado la adquisición o tenencia de recursos claves para la educación remota (computadores, tablets, celulares, etc.), como lo explican [5] [8] y [11].

V. CONCLUSIONES

1. La conclusión más sobresaliente es que las afectaciones fueron diferenciadas por estratos y niveles educativos y que los grupos menos favorecidos fueron, casi en todos los casos los que tuvieron reducciones o aumentos muy pequeños. En muchos casos los grupos más favorecidos mejoraron su desempeño. Como resultado, las desigualdades se acentuaron entre esos grupos.
2. El efecto neto de la pandemia fue bastante pequeño, en comparación con las desigualdades existentes en el país, caracterizadas por estrato socio económico, educación de la madre, género, tipo de institución. En realidad, el efecto no es nada despreciable y es estadísticamente significativo en todos los casos. Sumados los de todo el país, un cambio promedio sostenido representa un gran impacto. Lo que sucede es que su magnitud palidece al lado de las grandes desigualdades imperantes por estratos o nivel educativo.

REFERENCIAS

- [1] A. Alvero, S. Giebel, B. Gebre-Medhin, A. L. Antonio, M. L. Stevens, and B. W. Domingue, "Essay content and style are strongly related to household income and SAT scores: Evidence from 60,000 undergraduate applications," *Science advances*, vol. 7, no. 42, p. eabi9031, 2021.
- [2] R. Freedle, "Correcting the sat's ethnic and social-class bias: A method for reestimating sat scores," *Harvard Educational Review*, vol. 73, no. 1, pp. 1–43, 2003.
- [3] E. J. Dixon-Román, H. T. Everson, and J. J. McArdle, "Race, poverty and sat scores: Modeling the influences of family income on black and white high school students' SAT performance," *Teachers College Record*, vol. 115, no. 4, pp. 1–33, 2013.
- [4] H. G. van de Werfhorst, "Inequality in learning is a major concern after school closures," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 118, no. 20, p. e2105243118, 2021.
- [5] C. Haecck and P. Lefebvre, "Pandemic school closures may increase inequality in test scores," *Canadian Public Policy*, vol. 46, no. S1, pp. S82–S87, 2020.
- [6] M. E. Raymond, C. Han, S. Goulas, W. F. Lee, and C. Waeiss, "Estimates of learning loss in the 2019-2020 school year," *Center for Research on Education Outcomes at Stanford University*, 2020.
- [7] E. Dorn, B. Hancock, J. Sarakatsannis, and E. Viruleg, "Covid-19 and student learning in the united states: The hurt could last a lifetime," *McKinsey & Company*, vol. 1, pp. 1–9, 2020.
- [8] S. Hammerstein, C. König, T. Dreisörner, and A. Frey, "Effects of covid-19-related school closures on student achievement—a systematic review," *Frontiers in psychology*, vol. 12, p. 746289, 2021.
- [9] C. Haelermans, R. Korthals, M. Jacobs, S. de Leeuw, S. Vermeulen, L. van Vugt, B. Aarts, T. Prokic-Breuer, R. Van der Velden, S. van Wetten, et al., "Sharp increase in inequality in education in times of the covid-19-pandemic," *Plos one*, vol. 17, no. 2, p. e0261114, 2022.
- [10] M. Kuhfeld, K. Lewis, P. Meyer, and B. Tarasawa, "Comparability analysis of remote and in-person map growth testing in fall 2020," NWEA. Available online: <https://www.nwea.org/research/publication/comparability-analysis-of-remoteand-in-person-map-growth-testing-in-fall-2020/> (accessed on 29 October 2021), 2020.
- [11] J. E. Maldonado and K. De Witte, "The effect of school closures on standardised student test outcomes," *British Educational Research Journal*, vol. 48, no. 1, pp. 49–94, 2022.
- [12] L. Marín, M. R. Pico, D. Maldonado, and S. García, "Desigualdad en el aprendizaje durante el covid-19: evidencia para estudiantes de secundaria en Colombia," tech. rep., 2022.
- [13] S. Al-Ghazali, S. Harous, and S. Turaev, "Application of artificial neural network to estimate students performance in scholastic assessment test," in *2022 14th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, pp. 166–170, IEEE, 2022.
- [14] L. K. Abadía, S. C. G. Soler, J. C. González, S. C. G. Soler, and J. C. González, "Gone with the pandemic: effects of covid-19 on academic performance in colombia," tech. rep., Universidad Javeriana-Bogotá, 2021.
- [15] J. F. Birkelund and K. B. Karlson, "No evidence of a major learning slide 14 months into the covid-19 pandemic in denmark," *European Societies*, vol. 25, no. 3, pp. 468–488, 2023.
- [16] A. E. Hallin, H. Danielsson, T. Nordström, and L. Fälth, "No learning loss in sweden during the pandemic: Evidence from primary school reading assessments," *International Journal of Educational Research*, vol. 114, p. 102011, 2022.
- [17] A. Agresti, *Analysis of ordinal categorical data*, vol. 656. John Wiley & Sons, 2010.
- [18] O. Doyle, "Covid-19: Exacerbating educational inequalities," *Public Policy*, vol. 9, pp. 1–10, 2020.
- [19] M. Kuhfeld and B. Tarasawa, "The covid-19 slide: What summer learning loss can tell us about the potential impact of school closures on student academic achievement. brief.," NWEA, 2020.
- [20] M. Kuhfeld, J. Soland, B. Tarasawa, A. Johnson, E. Ruzek, and J. Liu, "Projecting the potential impact of covid-19 school closures on academic achievement," *Educational Researcher*, vol. 49, no. 8, pp. 549–565, 2020.
- [21] M. Kuhfeld, B. Tarasawa, A. Johnson, E. Ruzek, and K. Lewis, "Learning during covid-19: Initial findings on students' reading math achievement and growth. nwea research 2020," *Google Scholar*, pp. 1–12, 2020.

Design of a SFCC plant for the implementation of the project-based learning in a single control course

E. S. Escobar-Ortiz¹ , A. F. Guerrero-Guerrero²  and J. J. Paez-Rodriguez 

Abstract—Engineering education demands the development of problem-solving skills. Several educational alternatives have been integrated into the curricular proposals for engineering education. However, building a didactic physical material, which reduce the complexity of problems or with great use of simulators, leads to the complexity of the problems being far removed from the real problems of engineering control. On the other hand, although the didactic strategies are based on the development of problems, this type of methodology requires the didactic knowledge of the teacher, a clear intervention model and an evaluation model in accordance with the project methodology. This paper presents a version of the project-based learning methodology that integrates the principles of educational scaffolding, transversal skills and the use of a Single Face Cubli Cube (SFCC) control plant. The approach was developed with 10 electronic engineering students in a discrete control course. Up to this point the existing findings indicate that the proposed strategy contributes in an innovative way to skill development.

Index Terms—Project-Based Learning, Engineering Education, Control Plant.

I. INTRODUCTION

The skills to solve problems that involve Control Theory are fundamental for the professional development of engineers. Engineering academic programs that consider main topics of Control Theory often have problems due to the complexity of the topics and their articulation in solving real-world problems. However, the use of a Single Face Cubli Cube (SFCC) control plant in a PBL strategy for the control subject is an alternative to improve the control course goals. Based on the background and the results obtained by different authors, the use of PBL certainly impacts the development of problem-solving skills in control. This can be evidenced by an increase in students' average grades and the number of students who pass the subject.

The literature review shows a lack of studies that have effectively integrated conceptual components as cognitive, pedagogical-didactic, and technological, which collectively are useful for this proposal. Additionally, several studies, the metrics and their evaluation have been presented in a simple

way and with insufficient detail about the outcomes. Based on what was mentioned above, it can be inferred that the proposed framework supports the improvement of the cognitive issue and also contributes to the academic field.

A. Design of Problem-Based Learning Strategy

The PBL intervention proposal, which includes integrated support resources for students to build their knowledge, is summarized in Fig. 1.

Intervention Tutor Model. The intervention model is based on the scaffolding strategy [9]. The strategy considers tutor interventions in actions such as the reduction of degrees of freedom, direction maintenance, frustration control, and demonstration by marking critical features. These actions are presented through roles such as facilitator, assessor and evaluator which are proposed in the scaffolding strategy.

PBL Approach. The proposed learning strategy considers the Project Based Learning (PBL) approach which contemplates three principles [5]: 1) Cognitive Learning. Learning is organized having in mind certain problem and is carried out through projects. 2) Content. It considers the interdisciplinary and exemplary nature of learning. 3) Collaborative Learning. It affirms that learning originates from dialogue and teamwork [6].

Learning Activities. The learning activities are divided into two categories or orders. The first order proposes hands-on activities to promote experiential learning through exploration and interaction with the control plant. The second order integrates activities oriented to the development of transversal skills, autonomous learning and collaborative learning, such as brainstorming, peer-to-peer dialogues and research activities.

Didactic Resources. There are two types of resources involved in the intervention. The primary resource is the Single Face Cube Control Plant (SFCC). The secondary resources are the elements that intervene during the development of the project; for example, simulators and laboratory elements (multimeters, oscilloscopes, protoboards and microcontroller boards).

Project Phases. The project is developed in 3 phases (analysis, design and implementation). The first phase involves system identification, where students collaboratively identify the nature of the problem, input and output variables, and modeling techniques for mathematically representing the dynamics of the system. The second phase involves stability analysis and controller design for a

^{1,3}E. S. Escobar-Ortiz and J. J. Paez-Rodriguez are with Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá 110311, Colombia. e-mail: esescobaro@udistrital.edu.co; jjpaezr@udistrital.edu.co

²A. F. Guerrero-Guerrero is with Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá 252212, Colombia e-mail: afguerrero@ucundinamarca.edu.co

This paper was produced by the IEEE Publication Technology Group. They are in Piscataway, NJ.

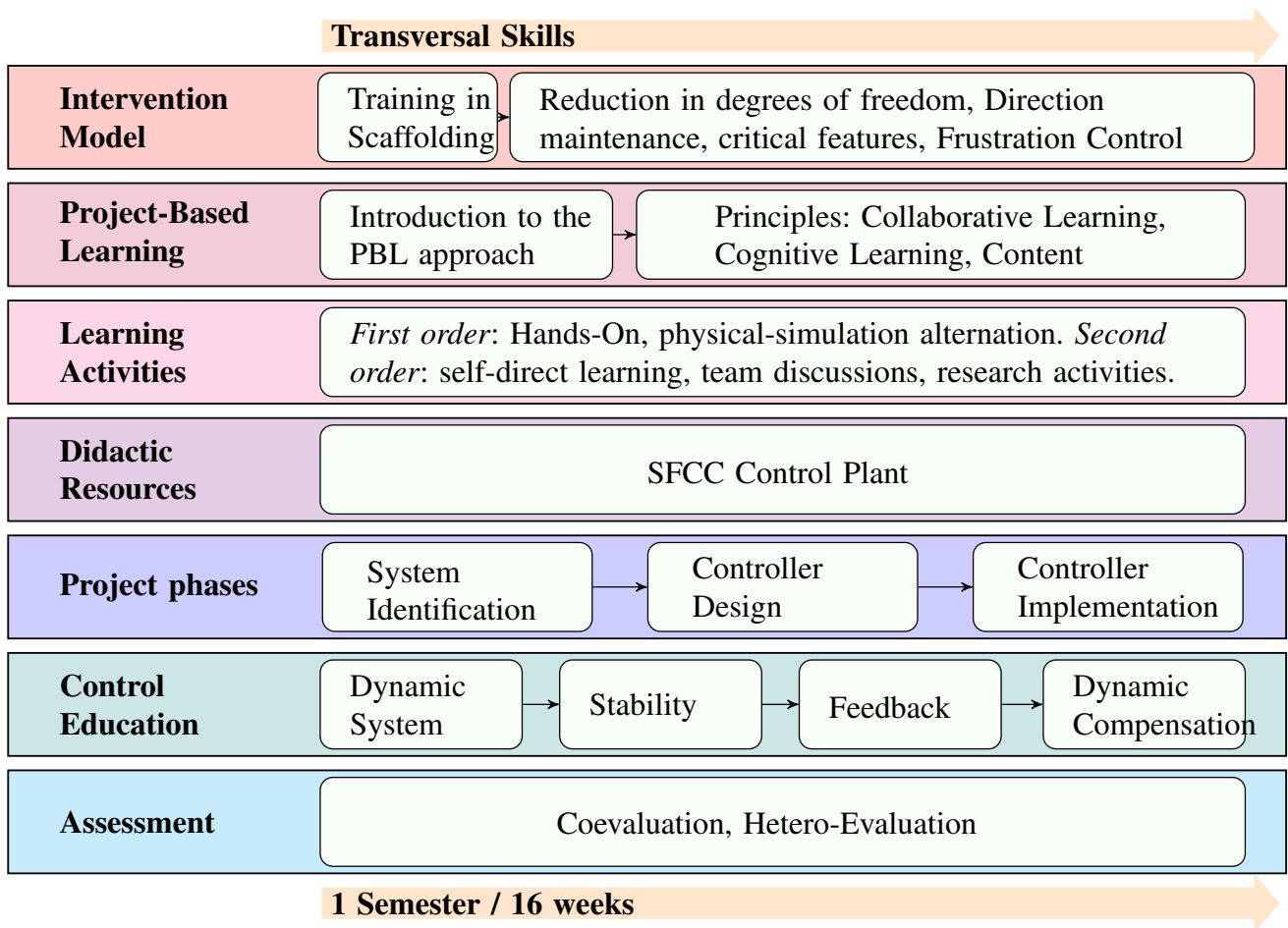


Fig. 1. Proposal for integration between PBL strategies with scaffolding using educational resources.

feedback control system. The third phase is the system compensation, which is achieved by implementing the controller in a microcontroller or embedded system.

Control Education in Engineering. Control education curricula mainly address four essential concepts [4]. 1) System Dynamics. It represents the characteristics and performance of the system over time. 2) System Stability. A system is stable when its output evolves in a similar way to the input variable. Stability can be assessed by the location of the poles in the complex plane, root locus, Nyquist criterion, or Bode plots. 3) System feedback. A method of obtaining an error signal by comparing the output signal with a reference. 4) Compensation. It is obtained by adding more dynamics to the closed-loop system to improve performance, an example being the action of a PID controller.

Assessment and Evaluation. During the development of the project, two types of evaluation are carried out. On the one hand, a hetero-evaluation is carried out by the tutor at the end of each phase of the project, in which the students present a written report and an oral presentation of the developed work. On the other hand, two co-evaluations are carried out, the first one where each team member evaluates his or her colleagues and the second one where the different teams evaluate each other.

II. METHODOLOGY

The methodological design that has been proposed is mixed. The research seeks to investigate the effect of the intervention based on PBL in a single control course. In the first phase of development, two stages of the analysis proposed in Fig. 4 have been advanced: the quantitative analysis of the pretest results and the qualitative-quantitative analysis with the evaluation of the presentation and direct observation.

A. Research Question

Pedagogical proposals in engineering education often fail to use didactic resources that provide students with opportunities to face actual complex problems. To tackle this problem, we present the research question: How does the use of a Single Face Cubli Cube (SFCC) control system in a PBL strategy affect the development of problem solving skills of Electronic Engineering students at the University of Cundinamarca, specifically in the area of control problems?

B. Participants

The test was developed in the Electronic Engineering program at the Universidad de Cundinamarca (Colombia),

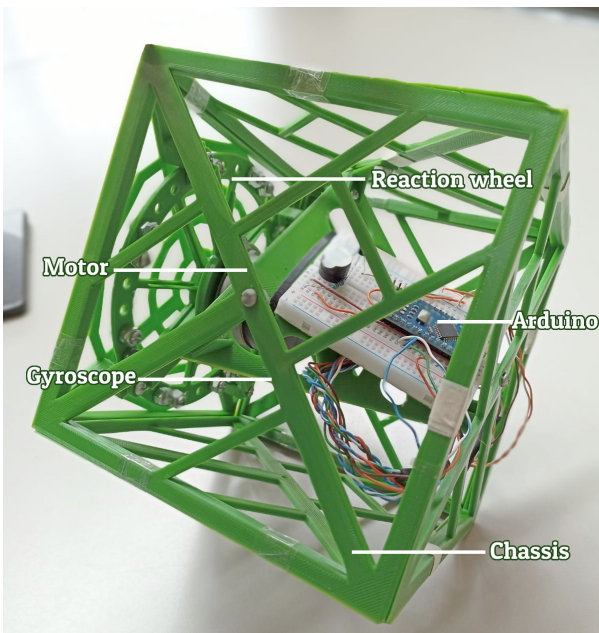


Fig. 2. SFCC Plant. Side view

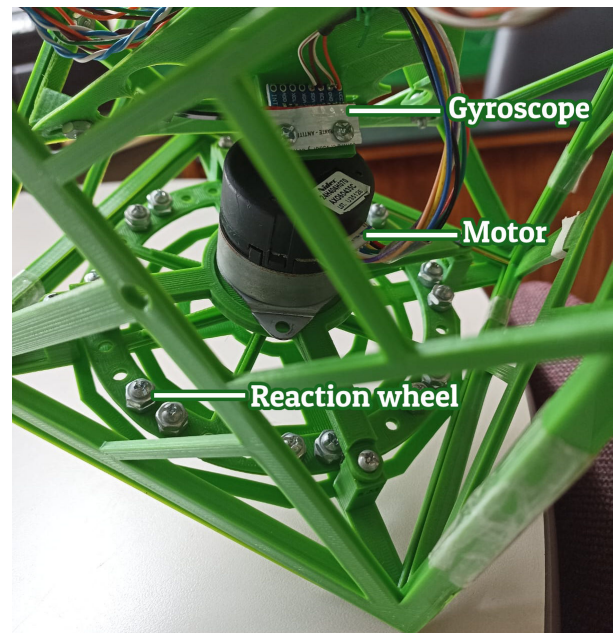


Fig. 3. SFCC Plant. Bottom view

with 10 students (2 females and 8 males) from the "Discrete Control" course (eighth semester). The average age of the participants is 23 years with a standard deviation of 2.18.

C. Materials

The control plant of the Single Face Cubli Cube (SFCC) is a variation of the Cubli Cube, as originally presented by Gajamohan [3]. The Cubli Cube design itself was based on robot prototypes developed by NASA for space exploration and satellite guidance [8] [7]. The SFCC system is designed to maintain balance on one of its edges by moving an inertial wheel. The system primarily comprises a cube-shaped structure acting as an inverted pendulum, an inertial wheel driven by a brushless motor, a gyroscope that measures the inclination level respecting the surface, and an embedded system, on which the controller is implemented on an Arduino board (see Fig. 2).

D. Procedure

The research design considers the mixed method strategy. It begins with a pretest to evaluate the control problem-solving skills. After that, the course project is developed according to the methodology proposed in Fig. 1. The experience ends with the post-test evaluation. The t-test is used to compare the data. Finally, both qualitative and quantitative data are interpreted. The academic semester consists of 16 weeks. The course follows a hybrid methodology, where 60% of the time is focused on lectures, written workshops, and complementary readings, while the remaining 40% of the time is devoted to the PBL project work that use SFCC. The project is divided into three stages: system identification, controller design, and implementation. The working groups are made up of 3-4 students randomly

assembled while considering academic GPAs to encourage peer learning. This means that high-performing students will work with others with lower GPAs to maintain homogeneity in the team [2]. In the first phase, two learning styles were identified: pragmatic and reflective [1]. A group of students focused on programming algorithms or lines of source code to control the position of the cubli. However, as the project has progressed, this group has been adopting a reflective style. In Fig. 5 a group is observed identifying the system from the physical magnitudes of the plant, while in Fig. 6 a work group is observed verifying background.

E. Metrics and Analysis

The intervention involves two metrics that are taken into account to assess the student's performance in achieving the stated objective. Considering that in the first phase of the development, students must conduct a preliminary documentation review, organize information, assimilate concepts, and assign a representation to the collected data, it is necessary for each workgroup to establish a teamwork strategy. For this reason, the metrics to be applied are focused on 1) problem-solving skills and 2) teamwork.

III. RESULTS

For each of these categories, the GPA of the group of students was calculated. From Fig. 7, it is evident that the predominant prior knowledge is related to system dynamics ($\bar{X} = 2.75$ and $SD = 0.65$). This may be a consequence of previous systems analysis and analog control courses where these topics were addressed. On the other hand, the grades obtained from the different activities or tasks handed in as homework and presentation of each one of the project stages are presented in Fig. 8. From the figure it is identified that

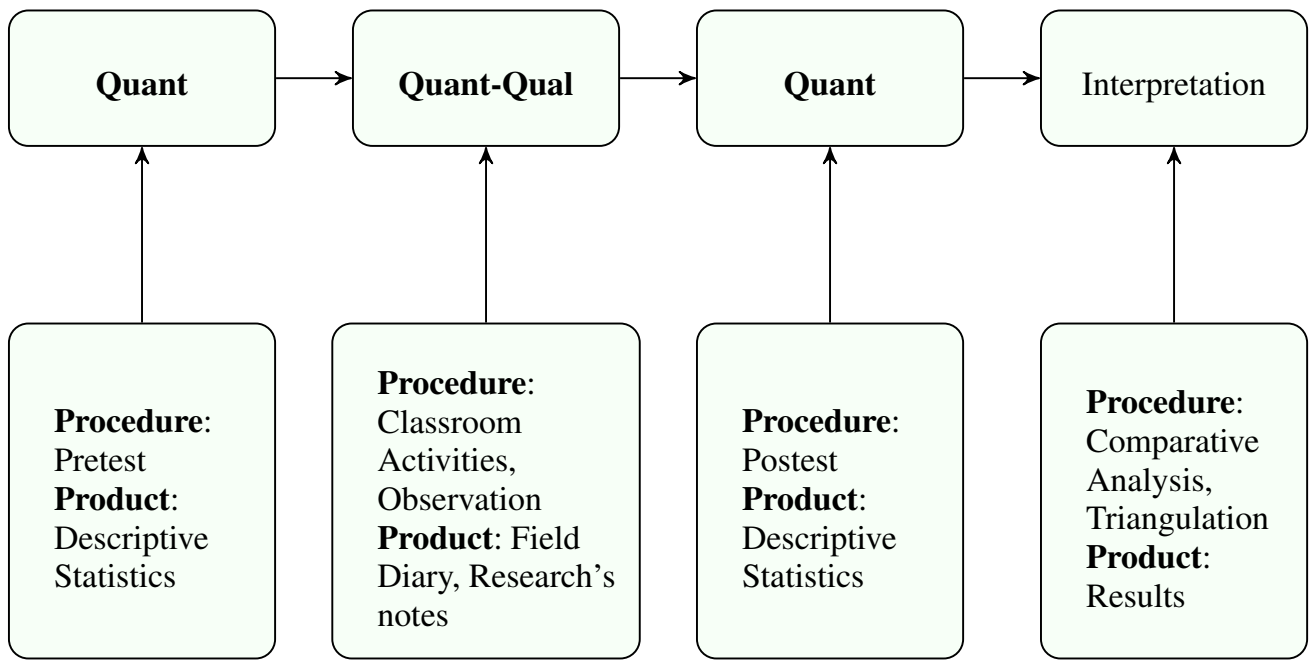


Fig. 4. Methodological design

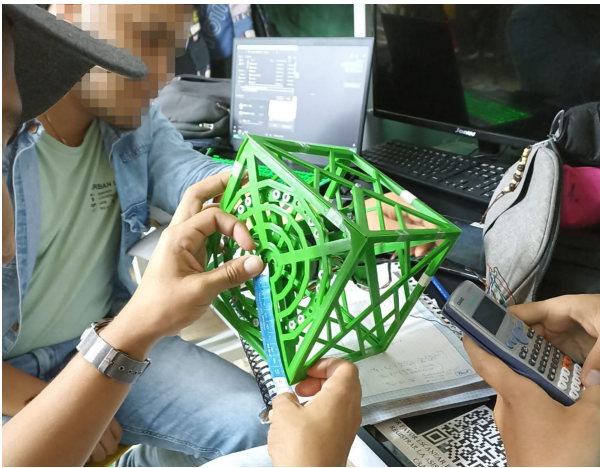


Fig. 5. Teamwork with a pragmatic learning style



Fig. 6. Teamwork with a reflective learning style

the groups with the best performance in the evaluation of prior knowledge (G1 and G2) obtained better results in individual development and presentation. Group 3 (G3) has the lowest GPA in each of the three tasks, showing difficulties in teamwork and problem solving in a control course. The workgroups presented the best performance in the final phase of the project, which is characterized by consolidating and applying the theory for the implementation of the controller. On the other hand, the development of the project using the PBL approach promoted the development of transversal skills such as teamwork and self-learning. From individual observation and group monitoring, the results reflected in the evaluation of the tasks were confirmed. The importance of prior knowledge in the learning process is highlighted, and the direct relationship

between the results obtained in development and the ability to work in a team is manifested.

IV. CONCLUSIONS

By focusing on the shortcomings of the strategies used by other authors in control education, a new hybrid methodological proposal based on traditional education, Project-based learning (PBL) and scaffolding was applied. The main advantages of this proposal were problem-solving and transversal skills development. Regarding the intervention model, it is noteworthy that while the scaffolding methodology is well known in education, engineering educators typically rely on empirical approaches. As for Problem-Based Learning (PBL), it is essential for both teachers and students to receive training in PBL, as the

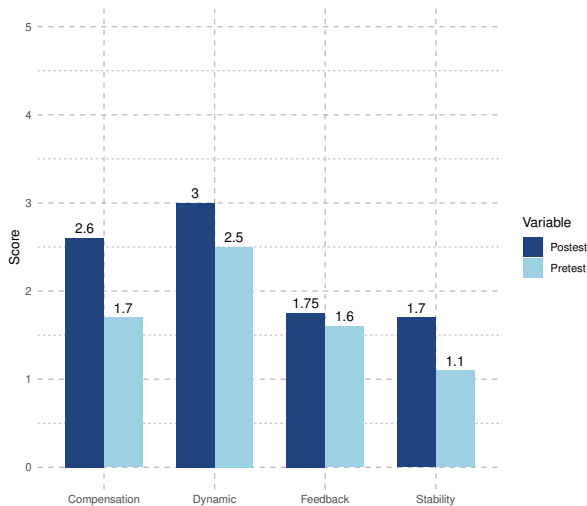


Fig. 7. Average results per pre-test and post-test categories

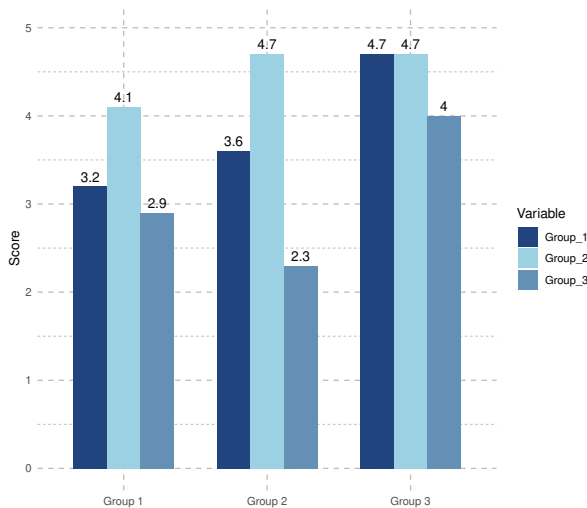


Fig. 8. Results evaluation by work groups

sudden shift from traditional teaching methods to PBL can generate resistance. In regard to the learning activities, it can be asserted that their development depends not only on the PBL strategy but also on the characteristics of the student groups. As for the didactic resources, the control plant SFCC allows for the development of topics related to non-linear systems, integrates control education concepts, and reduces the use of simulation environments, which facilitates preparation for real-world problems.

Project was divided in three phases align with fundamental control concepts: *Dynamic Systems*, *Stability*, *Feedback and Compensation*, and regarding evaluation, hetero-evaluation and co-evaluation have been conducted through report submissions and oral presentations. The results of the reports pre-test and pos-test have shown performance improvement in Dynamic Systems and Compensation concepts. Finally, the significance of prior knowledge in the learning process has been demonstrated, along with the ability to work in a team.

1) Acknowledgements: The authors appreciate the contribution of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia and Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá - Colombia.

REFERENCES

- [1] Alonso, C., Gallego, D., Honey, P.: Los Estilos de Aprendizaje: Procedimientos de diagnóstico y mejora (1994)
- [2] Fernández-Samacá, L., Ramírez, J.M., Orozco-Gutiérrez, M.L.: Project-based learning approach for control system courses. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **23**(Sba Controle & Automação, 2012 23(1)), 94–107 (Jan 2012). <https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000100008>, <https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000100008>
- [3] Gajamohan, M., Merz, M., Thommen, I., D'Andrea, R.: The cubli: A cube that can jump up and balance. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. pp. 3722–3727 (2012). <https://doi.org/10.1109/IROS.2012.6385896>
- [4] Kheir, N., Åström, K., Auslander, D., Cheok, K., Franklin, G., Masten, M., Rabins, M.: Control systems engineering education. *Automatica* **32**(2), 147–166 (1996). [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0005-1098\(96\)85546-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0005-1098(96)85546-4), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109896855464>
- [5] Kolmos, A., de Graaff, E., Du, X.: Diversity of PBL: - PBL Learning Principles and Models, pp. 9–21. Brill — Sense (2009)
- [6] Lee, H., Bonk, C.J.: Collaborative learning in the workplace: Practical issues and concerns. *International Journal of Advanced Corporate Learning (iJAC)* **7** (2014). <https://doi.org/10.3991/ijac.v7i2.3850>
- [7] NASA: 'hedgehog' robots hop, tumble in microgravity. NASA (Sep 03, 2015 [Online])
- [8] Pavone, M.: Spacecraft/rover hybrids for the exploration of small solar system bodies. NASA (Jul 29, 2014 [Online])
- [9] Wood, D., Bruner, J.S., Ross, G.: The role of tutoring in problem solving*. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* **17**(2), 89–100 (1976). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x>, <https://acamh.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x>

Producción de pesticida a base de aceite de Neem

Maria Alfonso y Ginna Trujillo
Fundación Universidad de América
maria.alfonso2@estudiantes.uamerica.edu.co

Resumen—Se considera plaguicida a cualquier material que, en estado puro o mezcla, tiene el potencial de matar plagas o malezas indeseadas. Se han clasificado sobre la base de plagas o malezas objetivo, el modo de aplicación y naturaleza química que afectan a los cultivos, o a los consumidores de estos. Comercialmente muchos de los plaguicidas están producidos sintéticamente y usados en masa en la industria agrícola. El proyecto propone obtener un plaguicida alternativo totalmente natural y sin efectos negativos a corto plazo, que pueda adaptarse gradualmente a pequeños productores agrícolas. La sustancia propuesta es un componente que se extrae de la semilla de árbol de Neem conocida como Neem *Azadirachta indica* A. Juss, de la familia *Meliaceae* (caoba), que también se identifica como margosa o lila india. Es reconocida desde hace tiempo como insecticida, esta propiedad ha demostrado que la toxicidad para los insectos genera una alteración grave del crecimiento y muda del insecto que sólo se observó con la Azadiractina al momento de que llega a tener un contacto con los organismo.

Palabras Clave—Árbol de Neem, Azadiractina, toxicidad, Nimbina, plagas, plaguicida, reducción de contaminación.

I. INTRODUCCIÓN

EL uso de plaguicidas sintéticos tiene un impacto negativo ambiental y sanitario tanto a corto como largo plazo, siendo importante brindar una alternativa orgánica que permita reducir las problemáticas que estas sustancias causan a los actores que participan en toda la etapa productiva. Se sabe que los agricultores son más propensos a padecer enfermedades como el Parkinson y algunos cánceres como el linfoma de Hodgkin. Ambientalmente el asunto no es menos grave, pues muchos de estos plaguicidas tienden a absorberse en la tierra filtrándose en ella y llegando a las fuentes hídricas y por lo tanto contaminando fuentes de agua subterránea [1].

De acuerdo con esto se encontró que el árbol de Neem, perteneciente a la familia de las *Meliáceas*, es un árbol de hoja perenne, que suele crecer hasta una altura de 15-20 contiene un principio activo que se ha usado como plaguicida y fungicida [2].

Las flores y frutos nacen en racimos axilares y cuando están maduras las drupas lisas son de color amarillo verdoso y comprenden una pulpa dulce que encierra una semilla. La semilla consiste en una concha y 1-3 granos que contienen Azadiractina y sus homólogos. Tanto la corteza como las hojas contienen moléculas biológicamente activas, pero no altos niveles de Azadiractina que se encuentran principalmente en los granos de semillas [3], siendo la principal fuente para la producción de pesticidas. La Azadiractina se produce en cantidades de 4-6 kg de semilla, dependiendo del ecotipo del árbol y las condiciones ambientales locales. Los árboles maduros pueden producir 2 kg de semilla por año.



Figura 1. Árbol de Neem [12]

El árbol se cultiva en la mayoría de las áreas tropicales y subtropicales del mundo para la sombra, para los programas de reforestación y las plantaciones para la producción de compuestos que tienen propiedades tóxicas, anti alimentarias y repelente contra insectos [3]. Esta planta de forma general interfiere en la alimentación de los insectos, suprimiendo la sensación de alimentarse. Con más de 200 variantes de alelos químicos, sus semillas contienen principalmente aceite de Nim con Azadiractina (AZA), el cual le otorga esta capacidad insecticida. En general las distintas partes de esta planta actúan como defensa frente a las plagas debido a todos sus componentes químicos, que purificados tienen una importancia terapéutica actuando como anti cancerígenos y antimicrobianos [4].



Figura 2. Semilla de árbol de Neem [11]



Figura 3. Flor de árbol de Neem [13]

El Neem se adapta a las regiones tropicales húmedas, subtropicales, y áridas y elevaciones que van a nivel mar, esto la hace una semilla que luego se convertirá en árbol, plantable durante los 12 meses del año [4]. Requiere de una temperatura máxima de 46 °C, y mínima de 26 °C, precipitaciones anuales de 400 a 1200 mm. Se adapta bien a suelos pobres en materia orgánica, de textura pesada, media y ligera, pH (grado de acidez) de 5.5 a 7.0, buen drenaje y una profundidad mayor a 150 cm; salinidad menor a 4 dS/m; y un fotoperíodo menor a 12 horas/luz. Puede prosperar en suelos rocosos y poco profundos (20-50 cm), soportar hasta 50 °C y un pH de 5 a 7.5, pero no soporta heladas o largos períodos de bajas temperaturas, ni suelos arenosos, secos y profundos, anegados y salinos [5].

El árbol puede sobrevivir en climas tropicales o subtropicales, por lo tanto puede cultivarse en regiones ubicadas entre los trópicos y cercanas a la línea ecuatorial, sin embargo necesita estar localizado en zonas subáridas o subhúmedas en suelos bien drenados, profundos y arenosos, con temperaturas entre 21 y 32 °C, y una pluviometría entre 400 y 1200 mm. Entre sus principales compuestos se encuentran la Azadiractina y la Nimbina [6].

Actualmente no se tiene mucha información acerca de los lugares en el departamento de Cundinamarca que tengan árbol de Neem, sin embargo, en la región de Armero – Guayabal existen 9.000 árboles, en 45 hectáreas, lo que hace pensar que un lugar en el departamento de Cundinamarca con condiciones climatológicas similares puede sin duda adaptarse para una pequeña plantación de este árbol. Teniendo en consideración el bajo costo de sus plántulas aproximadamente \$ 7.000 COP (\$ 1,79 USD) y la facilidad para conseguirlas [7].

Azadiractina $C_{35}H_{44}O_{16}$

(AZA) es el principal componente activo que se encuentra esencialmente en el interior de las semillas de Neem. La cantidad de Azadiractina en los granos de las semillas de Neem ronda el 0,2-0,8 % en peso, mientras que el aceite de Neem puede ocupar el 30-50 % del peso total de las semillas. La DL50 de las larvas de *Spodoptera littoralis* es de 1,00 ppm, mientras que la DL100 de los insectos *Schistocerca gregaria* es de 0,05 ppm. Dado que la dosis letal de los insectos es mucho

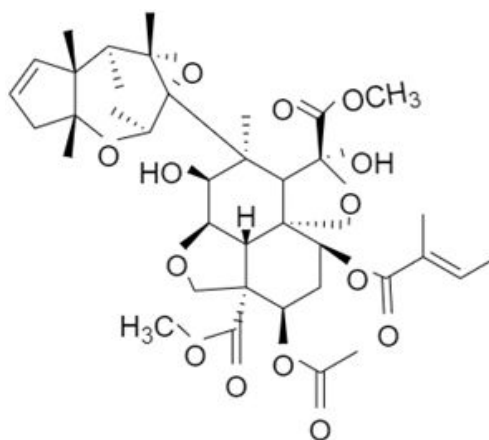


Figura 4. Estructura molecular Azadiractina. Fuente propia.

menor que la cantidad de AZA en el aceite de Neem, donde el aceite de Neem comercial puede contener hasta 10000 ppm de AZA, la emulsión puede ser una forma atractiva para producir aceite de Neem como biopesticida [7].

Nimbina $C_{30}H_{36}O_9$

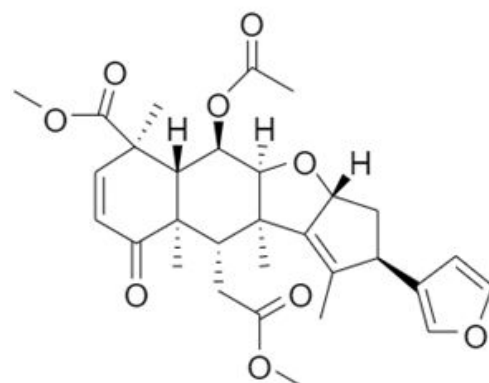


Figura 5. Estructura molecular Nimbina. Fuente propia.

La Nimbina del Neem se ha estudiado como plaguicida natural. El Neem y sus compuestos pueden repeler insectos y afectar su desarrollo, ofreciendo una alternativa más segura a los pesticidas químicos en la agricultura sostenible. Su eficacia varía según las condiciones y las plagas específicas. La Nimbina, que se extrae de las semillas del Neem, tiene propiedades medicinales como antipirético, anti fugitivo, anti-séptico antiinflamatorio y antihistamínico.[8]

El uso de plaguicidas sintéticos tiene consecuencias perjudiciales, debido a que pueden quedar residuos de estos en los cultivos, y pueden contaminar las fuentes hídricas por filtración. También algunos plaguicidas matan insectos beneficiosos. Aparte de esto, los plaguicidas, incluidos los organofosforados y los carbamatos, llegarían a causar graves efectos en la salud. [9]

Se vuelve necesario entonces buscar una alternativa ecológica que disminuya los efectos negativos de los plaguicidas sintéticos. El aceite de Neem o más específicamente la Azadi-

ractina es una gran alternativa, esta, actúa como regulador del crecimiento y disuasivo de la alimentación y la ovoposición de los insectos, interrumpe el proceso de crecimiento de los insectos y, por lo tanto, evita que las larvas se conviertan en adultos. Además de su buen funcionamiento contra las plagas, no tiene efectos contaminantes, tiene una muy baja toxicidad con mamíferos, además con algunas plantas se comporta como un insecticida sistémico, lo que quiere decir que penetra en los tejidos de algunas plantas volviéndose tóxicas para las plagas, esto es un beneficio pues no se tiene que fumigar tan frecuentemente [5].

Al desarrollar un plaguicida alternativo a base de aceite de Árbol de Neem se deberá analizar los componentes principales del aceite de árbol de Neem en su aplicación como plaguicida siendo la manera de diseñar un producto innovador y orgánico que reemplace los plaguicidas sintéticos para demostrar los beneficios del uso de plaguicidas orgánicos en la industria agrícola [10].

Siendo altamente efectivo en la lucha contra larvas de insectos como *Spodoptera littoralis*, *S. gregaria* y *Oncopeltus fasciatus* (chinche). Su toxicidad y capacidad para interrumpir el crecimiento de los insectos son notables y se encuentran principalmente en este compuesto. Sin embargo, se ha observado que compuestos menos complejos y menos oxigenados no tienen el mismo efecto tóxico en los insectos.

Por otro lado, la capacidad de los triterpenoides Neem para actuar como antifeedantes varía según la especie de insecto y su orden taxonómico. Esto sugiere que no hay una correlación explícita entre la actividad anti alimentaria y la toxicidad de los triterpenoides Neem en todas las rutas biosintéticas hacia la Azadiractina.

II. METODOLOGÍA

La extracción de aceite de neem de sus semillas se lleva a cabo mediante el proceso descrito a continuación:

II-A. Preparación de las semillas

Las semillas recolectadas se deben lavar y secar ya que las semillas frescas o húmedas pueden contener más humedad, lo que dificultará la extracción del aceite. Después de secar se retira la piel y se hace una molienda para asegurar un tamaño de partícula homogéneo evitando la pulverización.

II-B. Maceración en frío

En un extractor de vidrio se coloca semillas trituradas, con una relación en masa suficiente para una extracción con alto rendimiento. Sobre esta biomasa se vierte suficiente hexano o etanol en una relación aproximada de 1:3 de semillas a solvente en peso. Cubrir el extractor para evitar la evaporación del solvente, asegurando temperatura constante. Pasadas 24 horas realizar una destilación simple para recuperar el disolvente y purificar el aceite de neem.

II-C. Extracción Soxhlet

Para comparar el rendimiento del método de extracción se realiza un montaje Soxhlet con las semillas de neem trituradas. En el matraz inferior del aparato Soxhlet, colocar como disolvente de extracción etanol. El disolvente en el balón se calienta hasta evaporación, y entra en contacto con las semillas. Se permiten los ciclos necesarios para asegurar la extracción completa del aceite de neem presente en las semillas.

Este método de extracción Soxhlet suele ser más rápido que el método de maceración, ya que el solvente se recicla continuamente, lo que aumenta la eficiencia de la extracción. Terminada la extracción, se realiza una destilación simple para recuperar el disolvente y purificar el aceite.



Figura 6. Esquema extracción de aceite de Neem .

II-D. Caracterización del aceite de Neem

Después de obtener el aceite de Neem se realizará una caracterización fisicoquímica, con el fin de determinar la composición del mismo.

II-E. Formulación del plaguicida

Con el aceite de Neem caracterizado se preparan diferentes formulaciones del pesticida y se determina su acción sobre una plaga seleccionada. Con el fin de evaluar su eficacia.

III. CONCLUSIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Al evaluar el efecto del aceite de Neem como repelente de plagas siendo un proceso que requiere una serie de pasos esenciales. En primer lugar, se espera establecer con precisión la plaga en la cual se enfocara el estudio, definiendo cómo repeler una plaga particular en un contexto agrícola o doméstico. A continuación, se procede a diseñar un experimento controlado, lo que implica la creación de un grupo de control que no estará expuesto al aceite de Neem y uno o más grupos de tratamiento que sí lo estarán, variando las concentraciones o aplicaciones según las condiciones requeridas. La selección de la plaga o plagas a estudiar. Luego, se procede a aplicar el aceite de Neem en las concentraciones y formas que se planean utilizar en la práctica real (aplicar concentraciones permitidas),

utilizando métodos como pulverización, aplicación directa, entre otros. La recopilación de datos es fundamental y debe incluir observaciones periódicas de la presencia de la plaga, los daños que pueda causar y las tasas de reproducción.

Una vez recopilados los datos, se utilizan análisis estadísticos apropiados para determinar si el aceite de Neem tiene un efecto significativo en la repulsión de la plaga, comparando la actividad de la plaga en los grupos de tratamiento con la del grupo de control. La interpretación de los resultados se realiza evaluando tanto la eficacia del aceite de Neem en la repulsión de la plaga como cualquier efecto secundario negativo en las plantas o el medio ambiente circundante. Posteriormente, los hallazgos se documentan y presentan de manera clara y objetiva, a menudo en la forma de un informe científico o un resumen de resultados.

Es esencial considerar las implicaciones de los resultados obtenidos. Esto implica reflexionar sobre si el uso del aceite de Neem como repelente es práctico y sostenible en términos agrícolas y medioambientales, y si existen posibles limitaciones o desafíos que deban abordarse en futuras investigaciones. Dado que los resultados pueden variar según las condiciones locales, las especies de plagas y la concentración del aceite de Neem utilizado, es posible que sea necesario repetir el estudio en diferentes contextos para obtener una comprensión más completa de la eficacia del aceite de Neem como repelente de plagas. En última instancia, este análisis riguroso y bien estructurado proporciona información valiosa sobre la viabilidad y eficacia de la aplicación del aceite de Neem para el control de plagas en condiciones específicas.

REFERENCIAS

- [1] M. B. Isman, "Botanical Insecticides in the Twenty-First Century-Fulfilling Their Promise?," EN65CH11_Isman ARjats.cls October, vol. 1, 2019, doi: 10.1146/annurev-ento-011019.
- [2] S. Takla, F. El-Dars, A. Amien, and M. Rizk, "Prospects of Neem Essential Oil as Bio-Pesticide and Determination of Its Residues in Eggplant Plants During Crop Production Cycle," Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, F. Toxicology & Pest Control, vol. 13, no. 2, 2021, doi: 10.21608/eajbsf.2021.181340.
- [3] G. Benelli et al., "Neem (*Azadirachta indica*): towards the ideal insecticide?," Natural Product Research, vol. 31, no. 4. 2017. doi: 10.1080/14786419.2016.1214834.
- [4] M. B. Isman, "Botanical insecticides in the twenty-first century-fulfilling their promise?," Annual Review of Entomology, vol. 65. 2020. doi: 10.1146/annurev-ento-011019-025010.
- [5] A. J. Mordue and A. J. Nisbet, "Azadiractina del árbol de neem *Azadirachta indica*: su acción contra los insectos *Azadiractina* hacer nim, *Azadirachta indica*: sua ACAO insetos contraindicaciones."
- [6] S. Takla, F. El-Dars, A. Amien, and M. Rizk, "Prospects of Neem Essential Oil as Bio-Pesticide and Determination of Its Residues in Eggplant Plants During Crop Production Cycle," Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, F. Toxicology & Pest Control, vol. 13, no. 2, pp. 1-15, Jul. 2021, doi: 10.21608/eajbsf.2021.181340.
- [7] S. Takla, F. El-Dars, A. Amien, and M. Rizk, "Prospects of Neem Essential Oil as Bio-Pesticide and Determination of Its Residues in Eggplant Plants During Crop Production Cycle," Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, F. Toxicology & Pest Control, vol. 13, no. 2, pp. 1-15, Jul. 2021, doi: 10.21608/eajbsf.2021.181340.
- [8] P. Ramadhany, J. R. B. Witono, and R. Rosaria, "Neem-based oil-in-water (O/W) emulsion as a biopesticide," IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 1053, no. 1, p. 012047, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1053/1/012047.
- [9] A. Jennifer Mordue and A. J. Nisbet, "FORUM Azadirachtin from the Neem Tree *Azadirachta indica*: its Action Against Insects," 2000.
- [10] A. Lucineudo De Oliveira Freire, G. Marinho De Sousa Filho, J. Romilson, P. De Miranda, P. C. Souto, and L. Valério Coutinho De Araújo, "CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO MINERAL DO NIM (*Azadirachta indica* A. Juss.) E CINAMOMO (*Melia azedarach* Linn.) SUBMETIDOS À SALINIDADE GROWTH AND MINERAL NUTRITION OF NEEM (*Azadirachta indica* A. Juss.) AND CHINABERRY TREE (*Melia azedarach* Linn.) SUBMITTED TO SALINITY," vol. 20, no. 2, pp. 207-215, 2010.
- [11] Árbol del neem, margosa. (no date) Árbol del Neem, Margosa - *Azadirachta indica*. Available at: <https://fichas.infojardin.com/arboles/azadirachta-indica-margosa-arbol-neem.htm> (Accessed: 21 September 2023).
- [12] Del Pino Miguel, "Neem, el misterioso árbol de la vida.," Libertad Digital, May 24, 2015.
- [13] Jdi (no date) Jardim das Ideias Stihl, Jardim das Ideias STIHL. Available at: <https://www.jardimdasideias.com.br/oleo-de-neem-o-que-e-e-como-usar/> (Accessed: 21 September 2023).

Ortesis para alineación de tibia con antecedentes de pseudoartrosis congénita y displasia fibrosa

Maritza Campos, Laura Soler, Miembros IEEE, Angie Diaz y Derian D. Espinoza

Resumen—La pseudoartrosis congénita de tibia con displasia fibrosa es una afección ortopédica que puede causar deformidades óseas y dolor crónico en pacientes jóvenes. En este proyecto, proponemos el diseño de una ortesis personalizada que tiene como objetivo tratar la deformidad tibial y aliviar el dolor articular subyacente de un paciente que presentó un arqueamiento óseo anterior después de una fractura. Esta ortesis a través de la aplicación controlada de fuerzas de compresión, busca lograr la realineación gradual del hueso sin causar daños asociados a la carga mecánica aplicada.

Palabras Clave—Alineación tibial, displasia fibrosa, ortesis personalizada, pseudoartrosis congénita. .

I. INTRODUCCIÓN

LA La ortesis planteada fue diseñada para una paciente de 22 años, que reporta irregularidad en la marcha desde los tres años producida por tumores de pseudoartrosis con displasia fibrosa en la tibia derecha (Fig. 1). Esta es una enfermedad ortopédica poco común, caracterizada por la incapacidad del hueso para consolidarse adecuadamente tras una fractura [1]. También puede ser causada de manera congénita, como en este caso de estudio.



Figura 1. Radiografía de la pseudoartrosis del caso de estudio

La paciente fue sometida a múltiples cirugías con el fin de retirar el tumor desgastando el hueso, requiriendo un trasplante de tibia. A la edad de 12 años sufrió una fisura ósea que se trató con un dispositivo ortésico. Este tratamiento generó una curvatura en la tibia (Fig. 2), que con el tiempo generó dolor en el tobillo.



Figura 2. Radiografía de la curvatura tibial del caso de estudio

Este estudio se hizo con el fin de diseñar y evaluar una ortesis personalizada que aborde de manera integral la curvatura tibial y el dolor asociado. Para esto se realizó un estudio previo de los diferentes tipos de ortesis que se encuentran en el mercado, que tienen como fin la corrección de alguna deformidad ósea. Dentro de las que destacan: Ortesis de tobillo para la corrección de pie equino la cual ayuda a mejorar esta condición con el uso de la ortesis en la noche en pacientes que han sufrido parálisis cerebral [2]. Las utilizadas en la escoliosis, basadas en la aplicación de fuerzas de compresión en tres puntos [3]. Posteriormente se determinaron las especificaciones para nuestra propuesta, partiendo de los requerimientos del paciente y los dispositivos del mercado, las cuales son: Comodidad, estética discreta, funcionalidad, ligereza, facilidad en el uso y mantenimiento así como la prevención de una nueva lesión.

Las siguientes etapas de esta investigación incluyen la exploración de variantes de diseño para abordar diferentes grados y tipos de desalineación de la tibia. Además, se tendrá en cuenta los factores económicos, permitiendo el fácil acceso a la población. Dándole un mejor panorama al tratamiento de este tipo de condiciones.

II. METODOLOGÍA

La evaluación clínica ha sido concluida como parte fundamental de nuestra investigación. En esta fase, realizamos una exhaustiva revisión analítica de un caso de estudio que presenta una desviación en la alineación de la tibia. Nuestro enfoque se basó en un minucioso análisis de la anatomía del paciente, siguiendo las pautas establecidas en [4].

Para llevar a cabo esta evaluación, empleamos imágenes diagnósticas obtenidas mediante resonancia magnética compu-

tarizada. Estas imágenes nos proporcionaron una representación tridimensional detallada de la tibia afectada, lo que permitió un análisis profundo de la estructura y la gravedad de la desviación en la alineación.

Posteriormente, a partir de estas imágenes se llevó a cabo el diseño CAD en el software Solidworks® del prototipo de la ortesis, siguiendo el enfoque utilizado en estudios previos [5]. Estas ortesis, mediante la aplicación de fuerzas de compresión específicas, buscaron la alineación gradual del hueso sin generar daño adicional, de manera similar a la ortesis diseñada para corregir el hallux valgus o el juanete [6]. La adaptación progresiva de las fuerzas se logró a través de un sistema de monitoreo y ajuste controlado [7]. Posteriormente, este diseño CAD fue evaluado en una simulación de elementos finitos para determinar su resistencia y durabilidad.

Después de que el diseño hubiera completado con éxito la evaluación simulada, se procedió a su fabricación mediante el proceso de termoconformado y plastificado. Inicialmente, se realizó la toma de un molde negativo y positivo de la pierna del paciente. Una vez obtenidos los moldes, se inició el proceso de termoconformado utilizando polipropileno y el molde correspondiente. Finalmente, se aplicaron técnicas de plastificado para definir la forma final de la ortesis, siguiendo el mismo enfoque utilizado en prototipos similares en estudios anteriores [8].

Finalmente, se llevó a cabo la evaluación biomecánica en el paciente para determinar la efectividad de la ortesis diseñada. En esta evaluación, el sujeto fue sometido a pruebas biomecánicas tanto antes de comenzar a utilizar el dispositivo como varios meses después de su uso diario. Estas pruebas incluyeron un estudio de captura de movimiento durante la marcha para evaluar la cinemática articular, radiografías para analizar la alineación y la integridad ósea, una evaluación de la escala de dolor en el tobillo y una medición de la fatiga en los músculos subyacentes al hueso lesionado, siguiendo el protocolo descrito en [9]. Los resultados de estas pruebas se utilizaron para analizar parámetros clave, como la efectividad de la corrección lograda por la ortesis y la adaptación del paciente al dispositivo.

A continuación, se muestra un diagrama (Fig. 3) de la metodología que describe el proceso realizado a lo largo del proyecto planeado.

III. FASE DE DISEÑO

Para elaborar el prototipo, se consideró la resonancia magnética del paciente. Se tomaron segmentos de la misma y se utilizaron para conformar un modelo preciso de la pierna del paciente, como se muestra en la (Fig. 4). Con esta información se procedió a diseñar la ortesis. Para lograrlo, se realizó el montaje de un cilindro moldeando sobre el lienzo que es la imagen de la resonancia magnética [10].

Posteriormente, se hizo la simulación y análisis de las fuerzas que se van a aplicar sobre la pierna, determinando así las características óptimas del diseño para así realizar el molde físico. Teniendo en cuenta el proceso de simulación mencionado anteriormente, se procedió al diseño físico. Para ello, se empleó un proceso de termoformado utilizando moldes



Figura 3. Diagrama de la metodología del proceso del proyecto

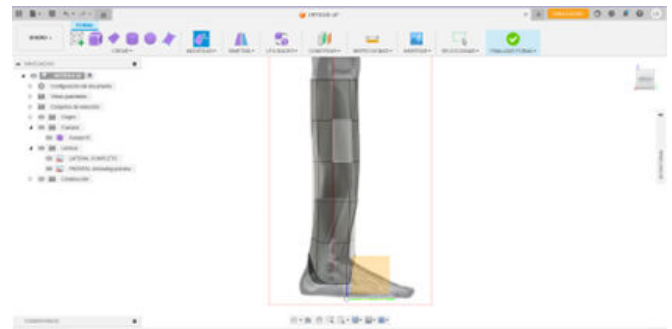


Figura 4. Proceso de diseño en Fusion 360

positivos y negativos de la pierna del paciente se utilizó polipropileno en el proceso de termoformación sobre el molde. [11]. Dado que la ortesis se aplicará únicamente en la parte posterior de la pierna del paciente, Además, se incorporaron velcros y placas en las áreas donde se ejerce presión sobre la tibia [12].



Figura 5. Prototipo diseñado en fusion 360

Para determinar las fuerzas aplicadas a la ortesis, primero se calculó la densidad ósea de la tibia. Para ello, se tomó un fragmento de la resonancia magnética del paciente que mostraba tanto la pierna afectada como la sana. Luego, se llevó a cabo un procesamiento de la imagen en python donde se segmentó el hueso como se muestra en la (Fig. 6). Esta segmentación se utilizó para identificar el área de cada tibia y determinar los píxeles en esta, determinando por medio del vector de píxeles el área más afectada de la tibia lo que permitió determinar la densidad ósea. para esto se utilizó la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{\# \text{ píxeles}}{\text{Área del hueso}} \quad (1)$$

Donde:

- ρ = Menor densidad ósea en el hueso.
- # píxeles = Valor más bajo de pixel.
- Área = Área donde se encuentra el píxel más bajo.

A partir de la ecuación (1), se determinó el valor de la densidad más baja de la tibia, identificando el punto en el cual el hueso puede fracturarse con mayor facilidad al aplicar fuerzas con la ortesis. Con estos datos, se estableció un criterio de fallo del hueso para así tener un rango de fuerzas que aplicar, evitando así provocar una fractura en el paciente. [13].

Las fuerzas aplicadas a la ortesis se controlaron cuidadosamente, midiendo la presión ejercida por los velcros. Esto se hizo con el objetivo de no superar el rango de fuerzas establecido para prevenir daños en la tibia del paciente.

A Continuación se muestra el diagrama de flujo del código empleado para el procesamiento de la imagen. (Fig. 7).

IV. PRUEBAS REALIZADAS

Para evaluar la eficacia de la ortesis desarrollada, se llevaron a cabo dos pruebas en el paciente. En primer lugar, se realizó un análisis de la dinámica inversa. Esta misma prueba también se efectuó en un individuo sin la patología, quien actuó como sujeto de control. El propósito de esta comparación era examinar las fuerzas involucradas en la marcha.

Todas las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de captura de movimiento de la Universidad Militar Nueva Granada. Previamente, se informó a todos los participantes sobre el procedimiento y se obtuvo su consentimiento informado. Luego, se procedió a realizar la prueba utilizando el protocolo

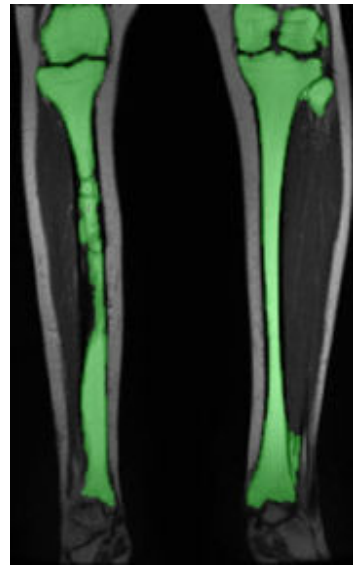


Figura 6. Segmentación Tibia afectada y Tibia sana

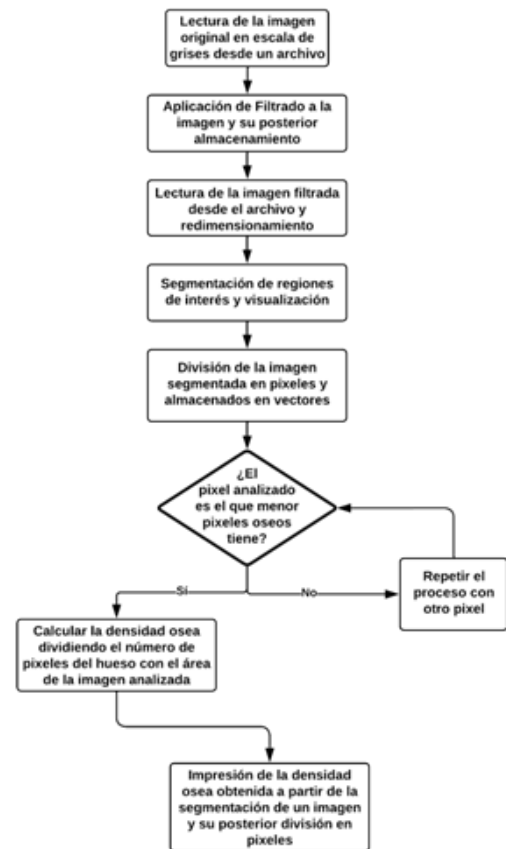


Figura 7. Diagrama de flujo procesamiento de imagen.

de marcadores Rizzoli Lower Body, que incluye un total de 30 marcadores [14].

Durante la prueba, se solicitó a los sujetos que caminaran sobre una plataforma de fuerza. El objetivo principal era determinar cualquier cambio en el esfuerzo ejercido en el

tobillo y la rodilla durante la marcha. Es importante destacar que esta prueba se llevó a cabo antes de que comenzara el tratamiento con la ortesis, como se muestra en la (Fig. 8).

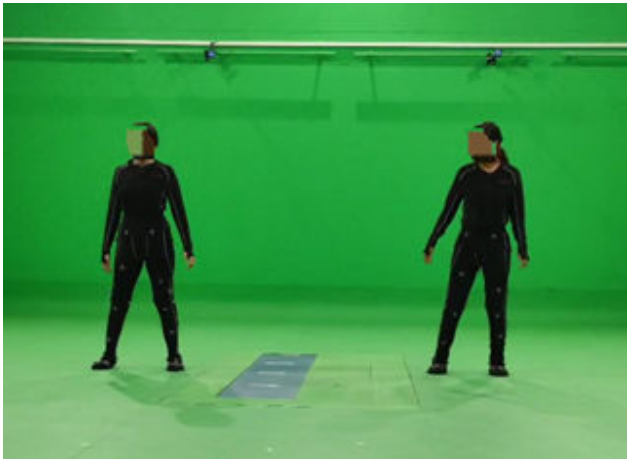


Figura 8. Toma prueba de dinámica inversa

Se realizaron radiografías para determinar si la tibia se estaba alineando correctamente, para esto se tomó una radiografía previa al tratamiento y se buscará realizar otra de control, 3 meses después de que el paciente comenzó el uso de la ortesis. Cabe aclarar que el paciente utiliza la ortesis durante todo el día, retirándose al momento de dormir, esto con el fin de que el tratamiento sea más eficiente [15].

V. RESULTADOS

Se prevé que la aplicación controlada de fuerzas de compresión dirigidas a lo largo del tiempo contribuirá al proceso gradual de realineación de la tibia. Esta alineación estimada se espera que resulte en una notable mejora en la estructura ósea, disminuyendo gradualmente la patología descrita.

Adicionalmente, se proyecta que la alineación mejorada del hueso tendrá un impacto positivo en el alivio estimado del dolor articular. Conforme la tibia se alinee más cercanamente a su forma anatómicamente correcta, se anticipa una reducción de la tensión indebida en las articulaciones adyacentes. Esto podría potencialmente disminuir la percepción del dolor por parte de la paciente, mejorando así su calidad de vida y capacidad funcional.

Es relevante enfatizar que estas estimaciones están fundamentadas en principios biomecánicos y en la comprensión de la interacción entre la alineación ósea y el dolor articular. No obstante, dado que aún no se disponen de resultados en este momento, estas proyecciones deben ser interpretadas con cautela. Se tiene planeado llevar a cabo investigaciones futuras para recolectar datos reales y evaluar si las estimaciones presentadas aquí se confirman en la práctica.

La personalización de la ortesis es una característica fundamental de este enfoque. La adaptación precisa a la anatomía del paciente permite la aplicación gradual de fuerzas de compresión, presumiblemente promoviendo la alineación progresiva del hueso sin ocasionar daños adicionales. La capacidad de ajustar las fuerzas a lo largo del tiempo también sugiere

que la ortesis podría adaptarse a las cambiantes necesidades de la paciente.

En última instancia, la propuesta de esta ortesis personalizada resalta el potencial de la tecnología médica avanzada en la resolución de desafíos ortopédicos complejos. Si los resultados estimados se confirman a través de investigaciones y pruebas empíricas, este enfoque podría representar un avance significativo en el tratamiento de la pseudoartrosis congénita de la tibia con displasia fibrosa, ofreciendo una alternativa no invasiva para mejorar la calidad de vida de los pacientes afectados.

REFERENCIAS

- [1] . "Deficiencias congénitas del miembro inferior. Actualización sobre la pseudoartrosis congénita de la tibia", Rev. Asoc. Argentina. Ortop. Traumatol., vol. 76, n.º 2, 2011.
- [2] .Torres, MD Romero, et al. Ortesis pasiva tobillo-pie de uso nocturno en la prevención del pie equino en la parálisis cerebral. Rehabilitación, 2015, vol. 49, no 3, p. 156-161.
- [3] . A. L. Velásquez Sánchez, "Elaboración de dispositivos ortopédicos órtosis tipo tlo para escoliosis y prótesis transtibial tipo ptb", Trabajo de graduación elaborado para la facultad de estudios tecnológicos, Universidad don bosco, Soyapango, el salvador, centro américa., 2007.
- [4] . V. Cortés Buitrago, "Experiencia del instituto de ortopedia infantil Roosevelt en el manejo de pacientes con pseudoartrosis congénita de tibia", Trabajo de grado de especialidad en Ortopedia y Traumatología, Universidad colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario, Bogotá.
- [5] . N. A. Abrego Palma, "Proceso de fabricación de ortesis tipo kafo y prótesis transtibial", Trabajo de graduación preparado para la facultad de estudios tecnológicos, Universidad don bosco, Soyapango, el salvador, centro américa, 2004.
- [6] . C. De Souza Nery, "Tratamiento conservador del hallux valgus juvenil mediante ortesis nocturnas", Rev Esp Cir Osteoart, Vol 32, N.º 187, pp. 32-37.
- [7] . A. Amaia Ilzarbe, "Análisis dinámico de las fuerzas de contacto ortesis-pierna mediante un modelo biomecánico tridimensional", Trabajo de grado en ingeniería biomédica, Universidad de Barcelona, Barcelona, España, 2014.
- [8] . Muñoz, Pelliccioni, O.; Müller-Karger, C. Diseño y construcción de un prototipo de bitutor largo de tipo kafo termoconformado. En Proceedings of the 9th Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Plata, Argentina. 2007.
- [9] . A. Villa Moreno, "Consideraciones para el análisis de la marcha humana. técnicas de videogramación, electromiografía y dinamometría", Rev. ing. Biomed, vol. 2, n.º 3, 2008.
- [10] 3D Life Uruguay. Cómo MODELAR una PRÓTESIS de Pierna humana (+ Tips de Diseño) en Fusion360. (19 de diciembre de 2020). Accedido el 20 de agosto de 2023. Video en línea. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=zmGF43fH6mM>
- [11] "Termoformado Protesis Pierna | PDF | El plastico | Vacío". Scribd. Accedido el 20 de agosto de 2023. En línea. Disponible: <https://es.scribd.com/document/329426094/Termoformado-Protesis-Pierna>
- [12] "Ortesis de tobillo y pie (AFO, por sus siglas en inglés)". St. Jude Children's Research Hospital. Accedido el 20 de agosto de 2023. Disponible: <https://www.stjude.org/es/cuidado-tratamiento/sabia-usted/rehabilitacion/ortesis-de-tobillo-y-pie-afo-por-sus-siglas-en-ingles.html>
- [13] J. R. Caeiro Rey, S. Dapía Robleda, E. Vaquero Cervino, L. Roca Ruiz y M. A. Blanco Ramos, "Factores determinantes de la resistencia ósea", Rev. Espanola Enfermedades Metab. Oseas, vol. 14, n.º 4, pp. 67-74, agosto de 2005.
- [14] A. Amaia, "Análisis dinámico de las fuerzas de contacto ortesis-pierna mediante un modelo biomecánico tridimensional", Master en ingeniería biomédica, Univ. Politec. Catalunya, Barcelona, 2014.
- [15] O'Connor J. McCaughan D. McDaid C. et al. "Orthotic management of instability of the knee related to neuromuscular and central nervous system disorders: systematic review, qualitative study, survey and costing analysis." National Library of medicine. En línea. Disponible: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK378877/>

Management of Hydrogen Production Systems through Conversion of Electric Power: A Case Study

Esteban Agudelo, Sara Echeverri, and Diego Mejía-Giraldo

Abstract—Green hydrogen is produced through electrolysis using renewable energy sources and is perceived as a key resource for meeting future energy demands. Thus, electric energy management systems play a fundamental role in green hydrogen production, as it allows the optimal control of the different components involved (electrolyzer, compressor, storage system), and to meet power demand of industries. In this article, an optimal energy management model, adapted from [2], is employed to consider the operation of a hydrogen production system integrated to an electric grid, a photovoltaic solar system, and a hydrogen storage system. The objectives focus on meeting the electrical and hydrogen demands of an industry at minimum cost. The resulting linear optimization problem is solved using Pyomo. Three case studies, under different hydrogen demand profiles, are presented and discussed.

Index Terms - Energy management system, electrolyzer, hydrogen cost, renewable energy, green hydrogen.

I. INTRODUCTION

DUE to increasing global warming and the greenhouse effect generated by fossil fuel gas emissions, the world energy system has undergone a series of changes in recent years. This, in turn, has encouraged a growing participation of non-conventional renewable energies within the energy matrix of multiple countries [1].

Hydrogen has been identified as a potential energy vector to decarbonize the energy system and reduce energy dependency on fossil fuels. The hydrogen has emerged as an energy carrier that could be stored and transported relatively easily, then transformed into electricity, heat or another good in a productive chain [1].

A significant portion of the scientific literature related to hydrogen supply chain management is mostly based on optimization approaches considering different energy sources for hydrogen production. In [2] the management of hydrogen, as raw material for a regional network is explored, in which hydrogen storage must be managed to minimize the system costs. Also, different objective functions are explored in the literature according to the particular hydrogen application. For example, in [3] the minimization of the cost of transport of hydrogen to be consumed in stations within the supply chain is considered; such an approach considers the interconnection and interactions among these stations. The authors also consider the renewable power for balancing supply and demand of this raw material. Finally, the objective function of [4] focuses on reducing CO₂ emissions, reduce energy purchase costs to propose a supply chain where the

costs associated with infrastructure and its maintenance are minimal.

Thus, this work has focused on analyzing the operational strategies involved in the hydrogen supply chain, starting from the electricity production to its conversion into hydrogen through electrolysis. A case study that involves a state-of-the-art of hydrogen supply chain management model is presented. A linear optimization-based model, adapted from [5], was implemented using Pyomo [6]. It assumes the existence of an hourly hydrogen demand curve that needs to be satisfied. To do so, the model considers the hydrogen supply chain: production through electrolysis, compression, and storage. Electrical energy is obtained from either a solar PV project or the power grid when strictly necessary. This work considers case studies based on the constraints and technical parameters from [5]. In particular, we have assumed the case of an industry acting as producer and selfconsumer of hydrogen.

II. OPTIMIZATION MODEL

A. Abbreviations

PV, Elz	Photovoltaic, Electrolyzer.
Cmp, Grd	Compressor, Grid.
Ld, HS	Demand, Hydrogen Storage.

B. Sets

T, t	Set of time steps indexed by t
--------	----------------------------------

C. Params

O^{HS}	Storage tank operating cost (\$/kg)
O^{Elz}	Electrolyzer sperating sost (\$/kWh)
o^{cmp}	Compressor sperating cost (\$/kWh)
O^{PV}	PV system operating cost (\$/kWh)
λ	Curtaiment energy cost (\$/kWh)
$N^{Elz,c}$	Number of electrolvzer sells
m_{H_2}	Hydrogen molar mass (kg/mol)
F	Earaday's constant (C/mol)
M_{max}^{Elz}	Maximum hydrogen production (kg/h)
P_{max}^{Elz}	Maximum electrical power of the electrolyzer (MW)
I_{max}^{Elz}	Maximum electric current of the electrolyzer (A)

$V^{Elz,c}$	Voltage in each electrolyzer cell (V)
k_{cmp}	Compressor senstant (MW/kg)
$P_{max}^{C\ map}$	Maximum sompressor power (MW)
Q^{HS}	Storage tank capacity (kg)
SoH_{min}	Minimum amount af hydrogen stored (%)
SoH_{max}	Maximum amount of hydrogen stored (%)
N^{PV}	Total number of solar panels
η^{PV}	Solar panel efficiency (%)
A^{PV}	Solar panel area (m ²).
P_{min}^{Grd}	Minimum grid power (MW)
P_{max}^{Grd}	Maximum grid power (MW)

D. Decision variables

TO_t	General operating costs (\$)
E_t^{Grd}	Cost amount of energy purchased from the grid (\$)
A_t^{PV}	Equivalent cost of wasted energy (\$)
M_t^{Elz}	Hydrogen production (kg)
p_t^{Elz}	Electrolyzer consumption power (MW)
p_t^{cmp}	Compressor consumption power (MW)
$p_t^{PV,m}$	Maximum power obtained from the solar system (MW)
MWh_t	Energy price (\$/MWh)
p_t^{Grd}	Power obtained from the network (MW)
$p_t^{PV,Crt}$	Curtaillment pexer (MW)
i_t^{Elz}	Electrolvzer cursent (A)
SoH_t	Percentage of hydrogen stored in the tank (%)
M_t^{Ld}	Industrx hydrogen demand (kg)
S_t^i	Solar irradiance (W/m ²)
p_t^{Ld}	Industry power demand (MW)

The optimization model consists of minimizing the cost of the hydrogen production system, the cost of waste of solar power, and grid power purchases as in [5]:

$$\sum_{t \in T} TO_t + MWh_t \cdot p_t^{Grd} + \lambda \cdot p_t^{PV,Crt} \quad \forall t \in T. \quad (1)$$

$$TO_t = (O^{HS} \cdot M_t^{Elz}) + (O^{Elz} \cdot p_t^{Elz}) + (O^{Cmp} \cdot p_t^{Cmp}) + (O^{PV} \cdot p_t^{PV,m}) \quad \forall t \in T. \quad (2)$$

Equation (2) represents the operational expenses (costs of electrolyzer, storage, compressor, and solar power) (OPEX). The second product of equation (1) give the cost of energy purchased from the power grid and the last product represents the costs associated with wasted photovoltaic solar energy.

III. A. HYDROGEN PRODUCTION SYSTEM CONSTRAINTS

The amount of hydrogen produced by the electrolyzer is proportional to the current that the system supplies to the electrolyzer:

$$M_t^{Elz} = \frac{N^{Elz,c} \cdot i_t^{Elz} \cdot m_{H_2}}{2F} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$0 \leq M_t^{Elz} \leq M_{max}^{Elz} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

The electrolyzer is modeled as a series electrical circuit whose current is employed to determine the hydrogen production as in eq. (3). The voltage in each cell of the electrolyzer is considered constant, to maintain the linearity of the model.

The consumption of the electrolyzer is given by:

$$p_t^{Elz} = i_t^{Elz} \cdot V^{Elz,c} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$0 \leq p_t^{Elz} \leq P_{max}^{Elz} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$0 \leq i_t^{Elz} \leq I_{max}^{Elz} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

The hydrogen produced from the electrolyzer is compressed to increase its storage density. The compressor power consumption is determined as follows:

$$p_t^{Cmp} = k_{Cmp} \cdot M_t^{Elz} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

The maximum power consumption of the compressor is determined according to equation (5) and (8) by the maximum hydrogen production of the electrolyzer M_{max}^{Elz} :

$$0 \leq p_t^{Cmp} \leq P_{max}^{Cmp} \quad (9)$$

The compressed hydrogen gas is then stored under high pressure for various uses. For storage, the following equilibrium condition must be met:

$$SoH_t = SoH_{t-1} + \frac{M_t^{Elz}}{Q^{HS}} \cdot \Delta t - \frac{M_t^{Ld}}{Q^{HS}} \cdot \Delta t \quad \forall t \in T \quad (10)$$

The storage condition of the tank is subject to the maximum and minimum amount it can store:

$$SoH_{min} \leq SoH_t \leq SoH_{max} \quad (11)$$

IV. B. SOLAR PV SYSTEM RESTRICTIONS

While the energy output of the photovoltaic solar system depends on variables such as irradiance, temperature, and operating point, there is always an operating point at which the maximum amount of energy is extracted from the system under the given environmental conditions. The maximum amount of power generated by a photovoltaic solar system can be calculated using the following expression:

$$p_t^{PV,M} = N^{PV} \cdot \eta^{PV} \cdot A^{PV} \cdot S_t \quad \forall t \in T \quad (12)$$

V. POWER BALANCE CONSTRAINT

The energy balance in the system must be always ensured, and it is defined as:

$$p_t^{PV,M} + p_t^{Grd} - p_t^{Crt} - p_t^{Elz} - p_t^{Cmp} - p_t^{Ld} = 0 \quad \forall t \in T \quad (13)$$

Finally, the amount of energy acquired from the grid is restricted to a minimum and a maximum, as the case may be:

$$P_{\min}^{Grd} \leq p_t^{Grd} \leq P_{\max}^{Grd} \quad (14)$$

For additional details of the model, the interested reader can refer to [5].

VI. RESULTS

Next, Fig. 1 illustrates the weekly price of electricity, hourly hydrogen demand, hourly power demand, and photovoltaic solar generation of a particular industry.

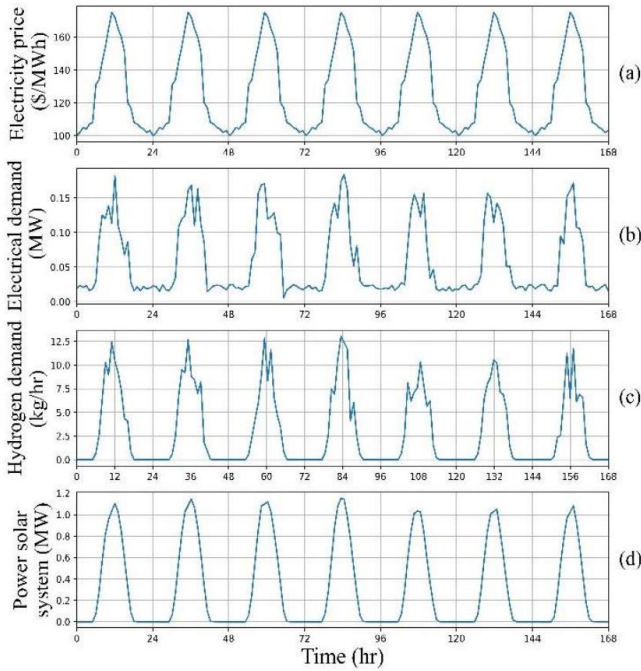


Fig. 1. System input data.

VII. CASE 1: HYDROGEN DEMAND FOLLOWS THE SOLAR PRODUCTION

The industry maintains its operations according to solar generation. In fact, both hydrogen and power demand follow the solar generation profile. This implies that hydrogen and electricity demands may be very small at nights, resulting in minimal energy purchases from the grid. However, during daytime, there is no need to buy energy from the grid as solar generation can meet the total demand, and even surplus energy is curtailed as is shown in Fig. 2 c. This can be observed from the third day of the week. Additionally, during periods of power curtailment, the optimization model has managed the system such that hydrogen tank supplies the hydrogen demand, as seen at noon in the fourth day as shown in Fig. 2 d.

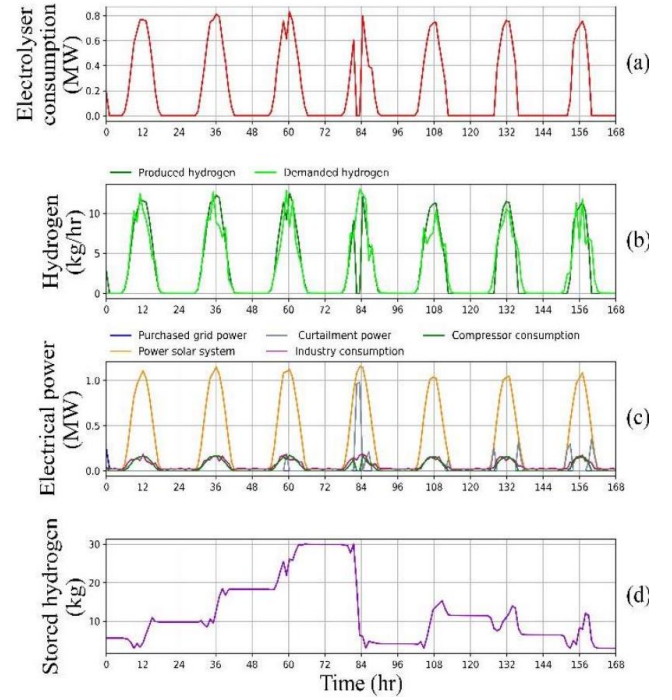


Fig. 2. Case study 1 results

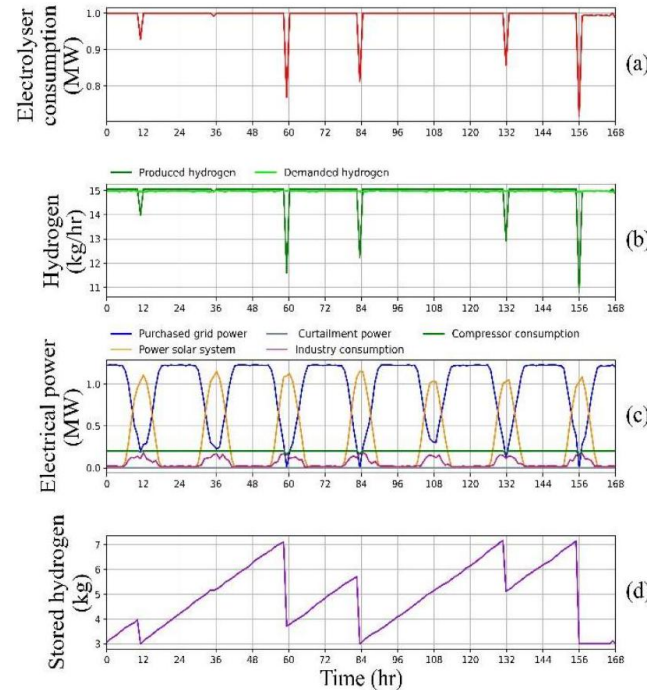


Fig. 3. Case study 2 results

VIII. CASE 2: CONSTANT HYDROGEN DEMAND

In Fig. 3 b, it can be observed that in the face of a constant hydrogen demand, close to the nominal capacity of the electrolyzer, the system operates using solar generation during daylight hours. Furthermore, the amount of energy purchased from the grid is minimal when solar generation is

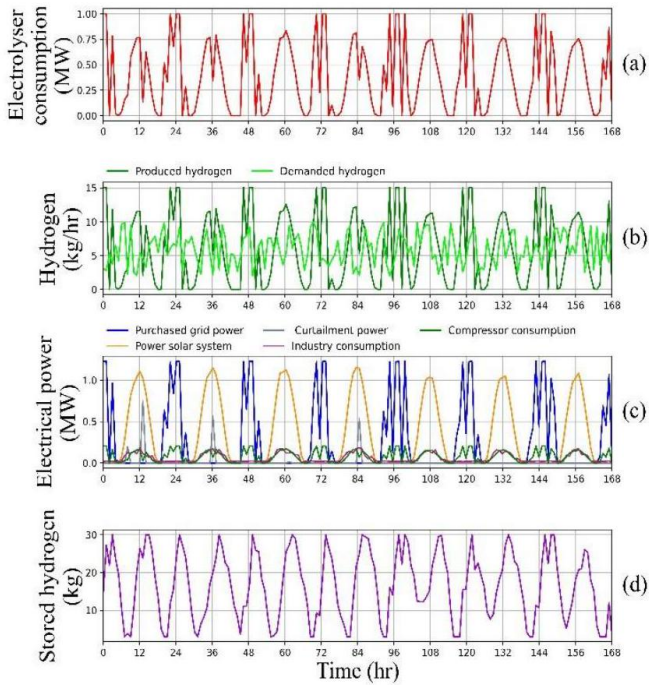


Fig. 4. Case study 3 results

at its peak, specifically around noon. Conversely, a different situation occurs at night, as indicated in Fig. 3(c), where the requirements of electrical energy are satisfied entirely from the grid. Fig. 3 d, shows how storage is managed during the optimization horizon. The stored hydrogen increases when there is a surplus of production compared to the demand, as observed in Fig. 3 b. Additionally, when hydrogen storage is responsible for meeting the demand, it can be observed that the energy purchased from the grid is reduced, and the electrolyzer reduces power consumption during those intervals, as shown in Fig. 3 a, and Fig. 3 c.

IX. CASE 3: VARIABLE DEMAND

Finally, hydrogen demand displayed in Fig. 4 b, fluctuates approximately between 3 and 10 kg/hr. Given that demand falls below the capacity of the electrolyzer, there is no need to purchase energy from the grid during the day. In fact, there is again a power curtailment around noon, as can be seen in Fig. 4 c. The storage management follows a very symmetrical pattern along the optimization horizon, as can be seen in Fig. 4 d, where it can be seen that at night when the grid energy is cheaper, it is used to store the tank in its entirety and so, in the morning hours of each day, the demand for hydrogen is supplied from the storage tank, when the price of energy begins to increase and the solar generation is not yet sufficient to cover the energy needs, the hydrogen demand is supplied from the storage tank, then, at noon, when there is a maximum solar generation that such that there is a surplus of energy that is used to store the hydrogen tank to the maximum.

X. CONCLUSION

This work applies recent energy management models equipped with hydrogen production systems. This kind of tools allow to analyze and understand what should be the optimal behavior of the hydrogen supply chains in order to achieve significant savings in terms of economics, operations, and, most importantly, energy. In these management models, energy storage (in this case, in the form of hydrogen) plays a crucial role as it allows for meeting hydrogen demand when its production is not possible.

XI. ACKNOWLEDGMENT

We are grateful to the royalties project of the GIMEL group "Desarrollo y apropiación de tecnologías convergentes para la generación del conocimiento y la infraestructura necesarios para almacenar energía solar en forma de hidrógeno verde, así como para el uso de este vector energético a nivel nacional.". From the University of Antioquia, BPIN Code 2022000100089, for the motivation and support provided in research work related to the management of green hydrogen.

REFERENCES

- [1] UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA, "Prospectiva de la producción y uso del hidrógeno para la diversificación de la canasta energética y planificación enfocada al desarrollo sostenible en Colombia".
- [2] C. Wang et al., "Optimal Configuration of Hydrogen Storage System and Hydrogen Supply Chain Equipment for Regional Integrated Energy System", 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS), Jinan, China, 2020, págs. 976- 981.
- [3] S. Li, Y. Si, L. Ma, N. Xin, Z. Wu and M. Gao, "Hydrogen Pricing Method Based on Geographical Distribution Characteristics of Renewable Energy Base," 2022 4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), Beijing, China, 2022, pp. 671-676.
- [4] A. Almansoori, "Design and operation of a hydrogen supply chain considering CO2 mitigation strategies - A case study of the United Arab Emirates," 2015 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Canada, 2015, pp. 1-5.
- [5] A. M. Abomazid, N. A. El-Taweel and H. E. Z. Farag, "Optimal Energy Facility Using Integrated Battery Energy Storage and Solar Photovoltaic Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 13, no. 3, pp. 1457-1468, July 2022
- [6] Center for Computing Research, "Pyomo", Pyomo. En línea. Disponible en: <http://www.pyomo.org/> Consultado: 06-agosto-2023.