

ISSN 2594-2921

Científica

Científica: Journal of Electromechanical Engineering | vol. 27, no. 1 | January-June 2023 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



3D Scanning to Enable 3D Printing in Ergonomics Projects

Escaneo en 3D para factibilizar la impresión 3D en proyectos de ergonomía

Josean L. **Vega-Feliciano**; Angélica P. **Vera-Torres**; Natalia A. **Rodríguez-Figueroa**;
Zairelys A. **Reyes-Rivera**; Clara E. **Isaza**; Mauricio **Cabrera-Ríos**.

Una perspectiva sistémica en la calidad en el servicio de microempresas restauranteras en destinos con vocación turística

Current Situation of Restaurant Microenterprises in Destinations
with a Tourist Vocation from a Systemic Perspective

Mitzi Lourdes **Rodríguez-Escalona**; Luis Manuel **Hernández-Simón**; Ricardo **Tejeda-Padilla**.

Aplicación del modelo TSP en la planificación de rutas de una empresa de servicio de limpieza

TSP Model to Route Planning in a Cleaning Services Company

Marlenne **Cruz Romero**; Jenaro **Nosedal Sánchez**; Danae **Abodón Lira**;
Jeddiel Gabriel **Chavez Talavera**; José **Aparicio Urbano**.

Diseño e implementación de un Autoencoder para la supresión de ruido de diferente naturaleza en imágenes de color

Design and implementation of an Autoencoder for the suppression
of noise of different nature in color images

Armando Adrián **Miranda-González**; Alberto Jorge **Rosales-Silva**; Dante **Mújica-Vargas**;
Ponciano Jorge **Escamilla-Ambrosio**; Jean Marie **Vianney-Kinani**; Floriberto **Ortiz-Rodríguez**.

Análisis de la gestión del tránsito vial mediante el modelo de sistemas viales: caso Ciudad de México

Analysis of Road Traffic Management Using the Viable System Model: Case Study – Mexico City

Sandra Luz **Morales-Güitrón**; Isaías **Badillo-Piña**; Katya **Rodríguez-Vázquez**;
Javier **Hernández-Hernández**; Jorge Armando **Rojas-Ramirez**.

Propuesta sistémica para mejorar la red mexicana de transporte aéreo de carga

Systemic Proposal for Improving the Mexican Air Cargo Transport Network

José Luis **Rodarte-Conde**; Jorge **Rojas-Ramírez**;
Flavio Arturo **Domínguez-Pacheco**; Rosalba **Zepeda-Bautista**.

Automatización de una incubadora de aves

Automation of a Poultry Hatchery

Luis Manuel **Valverde-Cedillo**; Geny Itzamar **Ochoa-Rodriguez**; Cristian Vicente **Salazar-Hernandez**.

Ecosistemas Digitales. Necesidad en el Sector Salud

Digital Ecosystems. Need in the Health Sector

Juan **Bory Rodriguez**; Jorge Arturo **Reyes Bonilla**.

Rediseño de una maquina automatizada, extrusora de plástico fundido, utilizando botellas PET para la fabricación de filamentos para impresoras 3D

Redesign of an automated machine, cast plastic extruder,
using PET bottles for the manufacture of filaments for 3D printers

Luis Humberto **López-Flores**; Andrés **Garcés Chávez**; Claudio **López-García**; Luis Manuel **Valverde-Cedillo**.

Aplicaciones de congruencias módulo m y ecuaciones diofantinas

Congruences Module m and its Applications and Diophantine Equations

Mario Antonio **Ramírez Flores**; Sergio Iván **González Medina**.

CIENTIFICA, year 27, issue 1 January-June 2023. Biannual Journal online published by Instituto Politécnico Nacional (Mexico) at Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, <https://www.cientifica.site>, email: cientifica@ipn.mx, Editor: PhD Christopher René Torres San Miguel. INDAUTOR Certificate of Reserve 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, granted by Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsible for the last update: Cuauhtémoc Jiménez Pérez, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Mexico City.

The responsibility of the materials published in Científica rests solely with their authors and their content does not necessarily reflect the criteria of the Editorial Board or the Instituto Politécnico Nacional. The total or partial reproduction of the texts hereby published is authorized as long as the complete source and the electronic address of the publications are cited, they are distributed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, there is no fee for article processing, submission or publication.

3D Scanning to Enable 3D Printing in Ergonomics Projects

Escaneo en 3D para factibilizar la impresión 3D en proyectos de ergonomía

Josean L. **Vega-Feliciano**¹, Angélica P. **Vera-Torres**², Natalia A. **Rodríguez-Figueroa**³
Zairelys A. **Reyes-Rivera**⁴, Clara E. **Isaza**⁵, Mauricio **Cabrera-Ríos**⁶

¹Universidad de Puerto Rico, PUERTO RICO

Recinto de Mayagüez, Industrial Engineering Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0002-8383-4726> | josean.vega1@upr.edu

²Universidad de Puerto Rico, PUERTO RICO

Recinto de Mayagüez, Industrial Engineering Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0002-2845-7147> | angelica.vera@upr.edu

³Universidad de Puerto Rico, PUERTO RICO

Recinto de Mayagüez, Industrial Engineering Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0002-2104-7698> | natalia.rodriguez55@upr.edu

⁴University of Puerto Rico, PUERTO RICO

Industrial Engineering Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0002-9737-808X> | zairelys.reyes@upr.edu

⁵Universidad de Puerto Rico, PUERTO RICO

Recinto de Mayagüez, Biology Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0001-5399-2566> | clara.isaza@upr.edu

⁶Universidad de Puerto Rico, PUERTO RICO

Recinto de Mayagüez, Industrial Engineering Department, The Applied Optimization Group

<https://orcid.org/0000-0002-2845-7147> | mauricio.cabrera1@upr.edu

Recibido 19-10-2022, aceptado 11-01-2023

Abstract

3D Printing is an ideal technology to support prototyping and invention. Its possibilities are, however, limited by the user's computer-aided modeling skills. Ergonomics would greatly enhance its practice with the adoption of the prototyping capabilities of 3D printers. For this to happen, Industrial Engineers who specialize in Ergonomics must adopt computer-aided modeling courses better suited to this end. Because curriculum modifications usually take a long time in colleges and universities to reflect a change of such nature, this work proposes the use of 3D Scanning to circumvent some of the difficulties in modeling and enable a more direct access to 3D Printing. The possibilities of this conjunction are demonstrated through the scanning and subsequent 3D printing of a human ear and a human skull.

Index terms: 3DPrinting, 3D Scanning, Ergonomics, Human Body Parts, Industrial Engineering.

Resumen

La impresión 3D es una tecnología ideal para apoyar las actividades de invención y prototipaje. Sus posibilidades están limitadas, sin embargo, por las habilidades de modelación por computadora del usuario. La ergonomía es un área que se beneficiaría con la adopción de las capacidades de prototipaje que ofrece la impresión 3D. Para que esto suceda, los ingenieros industriales especializados en ergonomía deben adoptar cursos de modelación por computadora más adecuados para este fin. Dado que la modificación de planes de estudio toma un tiempo muy largo en las universidades para reflejar un cambio de esta naturaleza, este trabajo propone el uso de escaneo 3D para cubrir algunas de las dificultades de modelación y facilitar así el acceso a la impresión 3D. El potencial de esta conjunción se demuestra aquí en el escaneo y la impresión 3D de los modelos de una oreja y un cráneo humanos.

Palabras clave: impresión 3D, escaneo 3D, ergonomía, partes del cuerpo humano, ingeniería industrial.

I. INTRODUCTION

Additive Manufacturing has become an important part of the so-called industrial revolution 4.0 [1]. In consonance with this trend, the introduction of 3D printing in Engineering curricula is a critical step that all Engineering fields related to fabrication and construction must consider taking. This dynamic provides a valuable opportunity for Industrial Engineers (IEs) to get reacquainted with prototyping and manufacturing [2]. 3D Printing is a process that creates physical objects from a digital model by adding material in a layer-by-layer fashion. The creation of the digital model, with roots in traditional mechanical modeling, is now a computer-aided skill mostly incorporated into Mechanical Engineering curricula. IEs need this modeling skill to capitalize on 3D printing as a prototyping method [3]. Ergonomics in particular, one of the IE subfields, would greatly benefit from the adoption of 3D Printing. As the area of knowledge concerned with the interaction between humans and their diverse environments, the possibility of translating ideas into functional prototypes faster can be a great asset.

Traditionally, curriculum development is a lengthy process in colleges and universities; therefore, it is important to pursue a parallel effort to enable the adoption of 3D Printing in Industrial Engineering. With this in mind, this paper proposes the use of 3D scanning to enable the access to 3D Printing. 3D scanning captures the external shape of an object in digital form through the assembly of a set of electronic images of such object. In healthcare, it has been shown that 3D Scanning can be used to support the creation of implants and prosthetics as well as anatomic models for training purposes, among several other possibilities [4]. In the same field, 3D Printing has been used to manufacture not only the former [5] but also -with a higher level of sophistication- to replicate biological tissue [6]. Healthcare, then, provides proof of the capabilities that can be transferred to ergonomics if the dyad modeling-printing is fostered in the training of IEs.

This work seeks to demonstrate the plausibility of the idea of 3D scanning to enable 3D printing using two applications carried out by IE undergraduate students. The path of improvement on each application is included in qualitative terms in the narrative, as it is considered of value to potential practitioners looking to replicate a similar effort. The hypothesis is that creating a 3D printout of a complex human body part can be made feasible through cost-effective 3D scanning at a competitive resolution. In testing this hypothesis, an alternative to accelerate the immersion of Engineering students to 3D Printing and enhance their training in ergonomics shall become apparent.

II. METHODOLOGY

Two development phases are recognized in this work: (i) learning and (ii) testing. The total time took about one year, starting from just the basic idea. After the protocol was developed, the next projects took less than one month to result in workable prototypes. In the first phase, learning, it was necessary for the students to get acquainted with the 3D printer and select a suitable, affordable, 3D scanner. The 3D Printer is a MakerBot Replicator 2, shown in Figure 1 [7], and the 3D Scanner was a mobile app called Trnio [8], which had shown promising results in preliminary tests using an iPhone. The second phase, testing, was an iterative one where variations on materials, parameters, scanning conditions -among others- were essayed to obtain a feasible protocol for scanning and printing.

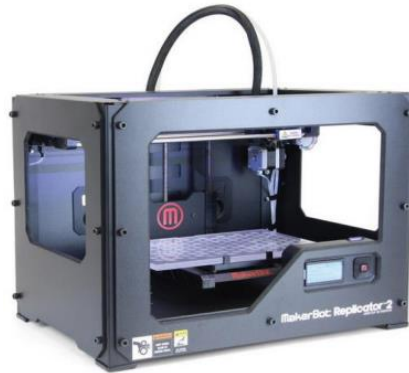


Fig. 1. MakerBot Replicator 2 3D Printer.

III. LEARNING EARNING PHASE

A human ear has a well-known complicated yet purposeful shape [9], [10]. Modeling it from scratch would require a considerable amount of skill. For these reasons, reproducing the shape of an ear was chosen as the first challenge. One of the students was the subject for scanning. It was recognized that variations on the scanning distance from the phone to the subject could have an effect on the images' quality, so to minimize this effect the phone was tied to a cord to maintain a constant radial distance. A total of six runs were executed sequentially as detailed in Table 1 and Figure 2. A general description of the scanning procedure used in the learning phase and the subsequent testing phase is presented in Appendix A.

Following Table 1, two types of filament material were used: (1) Polylactic Acid (PLA), which is rigid, and (2) Thermoplastic Polyurethane (TPU), which is flexible. This selection obeys to the variety of requirements in ergonomics endeavors, where sometimes rigidity is required -as in bone modeling- and other times, flexibility is required -as in tissue modeling-. Furthermore, a particular application might demand a combination of both properties. Indeed, PLA and TPU were used by themselves and, in the last two runs, combined to create a composite that capitalizes in their respective properties. In Figure 2, PLA is shown in white and TPU in green. Because 3D printing is a layer-by-layer material deposition process, the support for irregular shapes must be printed out simultaneously with the desired part and removed afterwards. This has important implications for the decision to either start printing out in one direction or another. In this case, the two positions essayed were termed "horizontally" or "vertically". The former refers to begin the process layering across the largest dimension of the ear (length), and the latter layering across its smallest dimension (width). The next to last column in Table 1 shows the relevant settings for the 3D Printer. In runs 1 thru 5 the settings were set as default by the manufacturer, a state that can be achieved by resetting the machine before a particular run. The only different setting was that of run 6, where infill was increased by 15%, looking for a more stable structure. The same effect was sought in runs 3 and 4 by augmenting the size of the printed object by 15%. Finally, the last column of Table 1 offers the key learnings on each run leading to the best results, which were achieved through the combined use of the different filament materials (runs 5 and 6). Success in the composite configuration had to do with using the rigid material first to build the support to then use the flexible material to build the actual ear. Although it is clear that no optimality can be claimed in this set of tests, the first aim here was feasibility: replicating an ear shape faithfully by 3D Printing based on 3D scanning. To this end, this series of learning runs were deemed successful. The implications to this point are that an intricate shape such as a human ear can be replicated to serve in ergonomics studies such as design of implants, design of objects that go in or around the human ear, or testing noise cancelling features, among many others.

TABLE 1
SIX RUNS IN THE LEARNING PHASE.

Run	Object	Filament Material	Position	Printer settings	Key learning/Observations
1	Human Ear	Flexible TPU	Horizontally	Default	Material is not strong enough to support the entire printout.
2	Human Ear	Rigid PLA	Horizontally	Default	No sufficient detail in ear's inner area due to printing position
3	Human Ear	Rigid PLA	Vertically	Default but object size was amplified	Vertical position and object size amplification result in a competitive configuration.
4	Human Ear	Flexible TPU	Vertically	Default but object size was amplified	Lost its precision resulting in irregularities and flexible material leaves hollow spots on the inside of the shell.
5	Human Ear	Composite PLA/TPU	Horizontally	Default	Composite material results in the best printout thus far.
6	Human Ear	Composite PLA/TPU	Vertically	Infill was increased by 15%	Vertical position allowed the support to reach the top of the ear. Equally as good as run 5.

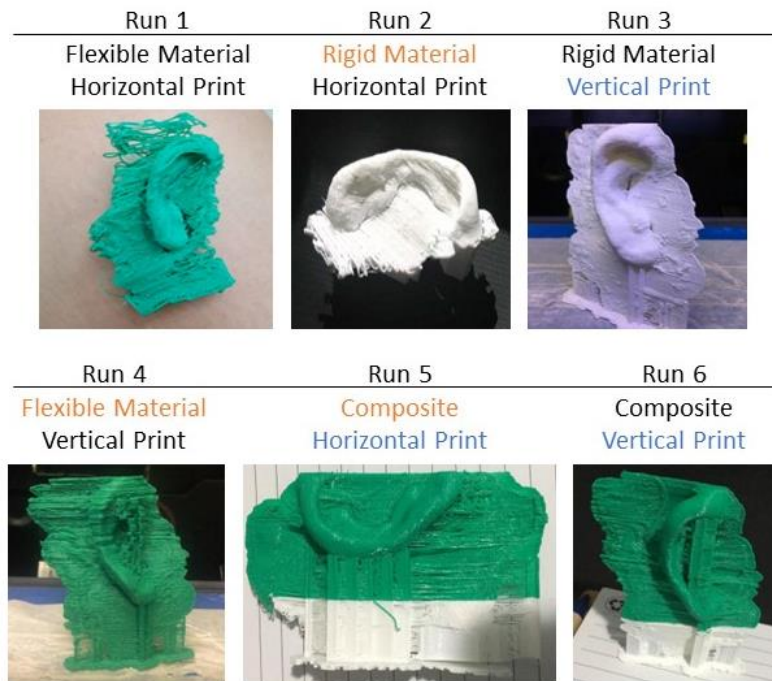


Fig. 2. Experimental runs in the learning phase. Changes on each run are indicated by the use of color: orange for material, blue for printing orientation.

IV. TESTING PHASE

With the learnings from the previous phase, it was decided to approach the replication of a human skull. This project is more challenging for scanning purposes, since it requires a higher level of detail fidelity including hollow features. A teaching model already existing in the ergonomics laboratory of our department (Figure 3), was used as the subject to be scanned.

Teaching model of
a human skull and
partial torso

Resulting Scan



Fig. 3. The teaching model of a human skeleton (selected features) and the resulting scan.

The teaching model was placed under direct artificial lighting (white light), and two rounds of complete scanning were performed to capture all details. The resulting scan is also shown in Figure 3. The default settings were used for 3D printing using PLA filament to outcome a rigid prototype. Table 2 details the runs executed to result in a satisfactory printout.

TABLE 2
THREE RUNS IN THE TESTING PHASE.

Run	Object	Filament Material	Position	Printer settings	Key learning
1	Skull Model	PLA	Vertically	Default	3D Scan was not detailed enough.
2	Skull Model	PLA	Vertically	Default but object size was amplified 50%	Size too big for the printer.
3	Skull Model	PLA	Vertically	Default, three scanning rounds	The more scanning rounds, the better results.

The first run was considered satisfactory, but it lacked enough details in the printed features. The second run was an attempt to correct that by increasing the size 50%. This second run proved successful in providing better details, but exceeded the printing dimensions of the 3D printer. Thus, the third run needed to add more details while keeping the size feasible. It was decided, then, to try to improve detailing thru the scanning process by adding one round for a total of three. This additional round provided a better quality of details that transferred to the actual printing, as it can be appreciated in Figure 4.



Fig. 4. Experimental runs in the testing phase. Run 1 is shown to the left, followed by run 2 in the middle, and run 3 is to the right, in brown.

Figure 5 shows a side-by-side comparison of the original object and the 3D Scan-Print reproduction for the reader to assess the level of fidelity. Do note, however, that the actual model is smaller in this case. The testing phase lasted considerably less time than the learning phase, expectedly. It becomes clear that having a model in short time enables design innovation and evaluation of ideas, thereby completing a powerful pipeline for ergonomics projects.

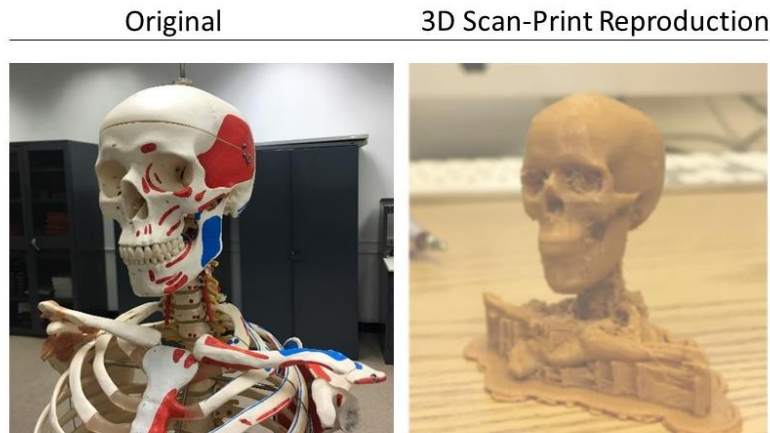


Fig. 5. Side-by-side comparison of original object and the 3D Scan-Print reproduction.

V. CONCLUSION

Technologies with the potential to enhance the practice of a field must find their way to thoughtful evaluation for adoption. Ergonomics -as a subfield of Industrial Engineering- can benefit from the adoption of Additive Manufacturing, and in particular of 3D printing to take ideas from inception to prototyping and, in the best case, to production. 3D printing, however, requires a high expertise level in mechanical modeling of 3D objects, not necessarily available to all Engineering fields. In this manuscript, 3D Scanning is proposed as an alternative to

modeling 3D objects from scratch. The work discussed here shows how students from Industrial Engineering can enhance their ergonomics training by adopting 3D Scanning. The possibility of having the physical prototype of an idea in short time is indeed an important addition to the field that can be implemented faster than the necessary curriculum modifications, which will require longer times. It is clear that different combinations of resources (3D Printers, mobile apps, subjects, materials, training in Mechanical Modeling) can improve the results beyond the feasibility point achieved in this work. Formal experimental design and mathematical optimization are recommended in the future to such end.

REFERENCES

- [1] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen, "The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 545–554, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>
- [2] T. W. Simpson, C. B. Williams, M. Hripko, "Preparing industry for additive manufacturing and its applications: Summary & recommendations from a National Science Foundation workshop," *Additive Manufacturing*, vol. 13, pp. 166–178, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2016.08.002>
- [3] S. M. Villanueva-Pérez et al., "Reintroducing Industrial Engineering Students to Manufacturing through Environmental Pertinence," *Científica*, vol. 25, no. 1, pp. 47–53, 2021, doi: <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n1a04>
- [4] A. Haleem, M. Javaid, "3D scanning applications in medical field: A literature-based review," *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 7, no. 2, pp. 199–210, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CEGH.2018.05.006>
- [5] H. Dodziuk, "Applications of 3D printing in healthcare," *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska, Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, vol. 13, no. 3, p. 283, 2016, doi: <https://doi.org/10.5114/KITP.2016.62625>
- [6] TRNIO, "Trnio 3D Scanner", 2022, <https://www.trnio.com/> (accessed May 22, 2022).
- [7] All3DP, "The Best 3D Scanner Apps of 2022 (iPhone & Android) | All3DP", 2022, <https://all3dp.com/2/best-3d-scanner-app-iphone-android-photogrammetry/> (accessed Jun. 05, 2022).
- [8] Makerbot, "MakerBot ® Replicator TM 2", 2022, <https://www.makerbot.com/es/3d-printers/replicator/>
- [9] G. Gomez, M. Baeza, J.C. Mateos, J.A. Rivas, F.J.L. Simon, D.M. Ortega, M. de los Ángeles, E.R. Del Campo, T. Gómez, J.L.L. Guerra, "A three-dimensional printed customized bolus: adapting to the shape of the outer ear," *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, vol. 26, no. 2, p.211, 2021, doi: <https://doi.org/10.5603/RPOR.a2021.0030>
- [10] W. Lee, H. Jung, I. Bok, C. Kim, O. Kwon, T. Choi, H. You, "Measurement and Application of 3D Ear Images for Earphone Design," *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 60, no. 1, p. 1053, 2016, doi: <https://doi.org/10.1177/1541931213601244>

APPENDIX A – General scanning procedure in the present work

Scanning can be understood as a system, where the inputs are the subject to be scanned and the mobile device loaded with the scanning app. The process is one where the mobile device is moved around the subject to capture as many details as possible. The output is a series of scans that are merged into a 3D model. For clarity, figure A1 illustrates the scanning process used in this study.

With these elements in place, there are controllable factors that immediately arise: illumination, angle of scanning with respect to subject, scanning distance to subject, trajectory of scanning device, position of the subject, and parameters associated to the scanning application.

In the scanning process, it is also expected to have non-controllable variables such as the initial quality of the subject, unintended variation produced during the scanning procedure, fluctuations in illumination or temperature, among many others. The response of interest is the quality of the resulting 3D model. This quality can be assessed qualitatively or quantitatively.

In the applications described in this work, it was decided to fix the mobile scanning device using a cord. The aim was to sufficiently control scanning distance, angle, and reduce scanning speed variation. In addition, the room with maximum indoor lighting available to us was selected to positively affect scanning. The scanning path was set radially using the mobile scanner tied up to the cord. At least two passes along the chosen scanning

path were carried out. The larger the number the passes, the better quality of the 3D model, but also the more digital memory required.

In the series of tests described in this manuscript, the final 3D models were assessed through superimposition over the original subject's image, qualitatively seeking for a satisfactory resemblance.

The results of the work described in this manuscript demonstrate the feasibility of this procedure, however, with more resources it is possible to reduce the variance and undertake a formal optimization of the entire process.

8

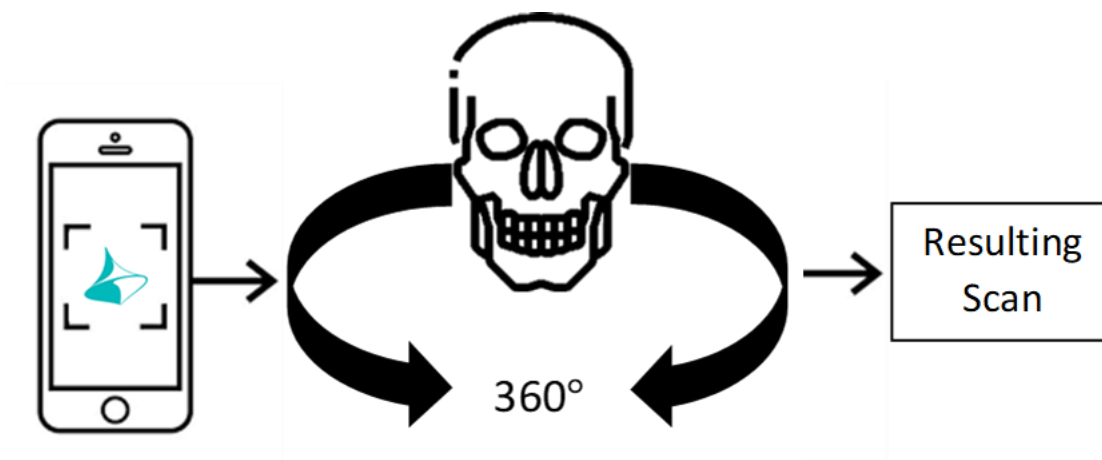


Fig. A1. Scanning process illustration.

Una perspectiva sistémica en la calidad en el servicio de microempresas restauranteras en destinos con vocación turística

Current Situation of Restaurant Microenterprises in Destinations with a Tourist Vocation from a Systemic Perspective

Mitzi Lourdes **Rodríguez-Escalona**¹

Luis Manuel **Hernández-Simón**²

Ricardo **Tejeida-Padilla**³

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-0275-6904> | mrodrigueze1800@alumno.ipn.mx

² <https://orcid.org/0000-0003-3028-3550> | hsimon10@ipn.mx

³ <https://orcid.org/0000-0003-4882-8096> | rtejeidap@ipn.mx

Recibido 19-11-2022, aceptado 28-02-2023.

Resumen

La calidad del servicio ha adquirido un papel muy importante, por lo que las empresas de alimentos o restaurantes se han ido ajustando a las necesidades actuales. Sin embargo, no existe un ente que evalúe y apoye las microempresas de alimentos y bebidas, las cuales son de gran apoyo y soporte económico en México al representar el 95.3% del total de las unidades económicas con un aporte del 1.1% del PIB. Este trabajo de investigación interpreta la situación actual de las microempresas restauranteras en destinos con vocación turística con una perspectiva sistémica. Para tal propósito se utiliza el Paradigma Sistémico por medio de la Metodología de Sistemas Suaves. Como resultado se llega a un diagnóstico sistémico de dichas microempresas identificando sus interacciones en conflicto y la falta de relaciones entre actores y entidades, sentando las bases de los sistemas relevantes en la dinámica de la gestión de la calidad de las microempresas restauranteras.

Palabras clave: calidad en el servicio, microempresas restauranteras, metodología de Sistemas Suaves.

Abstract

The quality of the service has acquired a very important role, which is why food companies or restaurants have been adjusting to current needs. However, there is no entity that evaluates and supports food and beverage microenterprises, which are of great support and economic support to México, representing 95.3% of the total economic units with a contribution of 1.1% of GDP. This research work interprets the current situation of restaurant microenterprises in destinations with a tourist vocation from a systemic perspective. For this purpose, the Systemic Paradigm is used through the Soft Systems Methodology. As a result, a systemic diagnosis of these microenterprises is reached, identifying their conflicting interactions and the lack of relationships between actors and entities, laying the ground work for the relevant systems in the dynamics of quality management of restaurant microenterprises.

Index terms: Service quality, restaurant microenterprises, Soft Systems Methodology.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2010, la riqueza de la gastronomía de México fue reconocida por la UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura) declarándola Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad, lo cual pretende ser un detonante para el desarrollo económico y social dentro del país [1]. Desde entonces, se pretendió que esta declaratoria promoviera la productividad de las unidades gastronómicas, se fomentara la competitividad entre los agentes de la actividad turística y se incrementaran programas o esquemas de certificación, financiamiento y calidad, con el fin de fortalecer esta cadena de valor.

Actualmente, la industria restaurantera en México aporta el 2% del PIB (Producto Interno Bruto) nacional y el 15.3 del PIB turístico, generando 5.5 millones de empleos vinculados a esta actividad económica [2]. Es por ello, que la Secretaría de Turismo ofrece y garantiza la calidad de los productos y servicios turísticos a través de distintos programas, certificaciones y distintivos que evalúan a los diversos establecimientos que los ofrecen, sin embargo, no existe alguno que garantice la permanencia ni la gestión de la calidad de estos a nivel microempresa de manera sistémica.

Esta investigación tiene como propósito estudiar e interpretar la situación actual en la gestión de la calidad de microempresas restauranteras en destinos con vocación turística en México, con el fin de sentar las bases diagnósticas que permitan emprender acciones para que estas empresas ofrezcan a los turistas servicios de calidad y con ello, aumenten su esperanza de vida o su permanencia dentro del destino turístico. Este trabajo de investigación describe las bases teóricas, así como los soportes metodológicos con el fin de proponer y desarrollar un diagnóstico del sistema de investigación, identificando los sistemas relevantes y sus interrelaciones tomando como base los postulados de la Metodología de Sistemas Suaves.

Se realizó una búsqueda del estado del arte, a través de distintas bases de datos científicas *Web of Science*, *ScienceDirect*, *Dialnet*, *Redalyc*, *Latindex* y *EBSCO* con palabras clave como calidad en el servicio, microempresas restauranteras, mipymes turísticas, calidad en restaurantes, perspectiva sistémica, servicio turístico. Se filtraron artículos sobre calidad en el servicio en general y posteriormente se tomaron como criterios de inclusión aquellos que tratan la calidad de empresas turísticas. Sin embargo, en la búsqueda no se encontraron publicaciones en la parte de calidad en el servicio de empresas turísticas a nivel micro. Si bien es cierto que se menciona por separado la calidad de una empresa y algunas publicaciones mencionan la parte de la gestión de las microempresas, estas no manifiestan una perspectiva integral considerando a los actores de la dinámica turística para poder comprender cómo es que una microempresa de alimentos y bebidas puede otorgar a los visitantes un servicio de calidad que le permita a su vez mantenerse en equilibrio en el contexto actual.

Actualmente, la gestión de la calidad dentro de las empresas turísticas de alimentos y bebidas se evalúa bajo los distintos programas de certificación y normatividad que ofrece como distintivos la Secretaría de Turismo, los cuales se otorgan con el fin de impulsar la mejora continua y excelencia de los servicios de alimentos y bebidas, no solo turísticos sino en general hacia aquellos establecimientos de la industria restaurantera, que se pueden obtener al cumplir con los criterios de evaluación marcados por la misma Secretaría.

No obstante, pese a que la gastronomía de México es reconocida como patrimonio inmaterial de la humanidad por los distintos ingredientes de sus platillos, no se le otorga la importancia que este reconocimiento conlleva dentro de la cultura gastronómica de México, olvidando que cada platillo, cuenta con distintas técnicas de elaboración y forma parte de la historia de nuestro país, generando con ello la cultura e identidad en cada lugar.

En cuanto a microempresas, pese a que forman la mayor parte de los comercios que existen dentro del país y sostienen la economía, no se generan estudios encaminados para que este tipo de unidades económicas amplíen su ciclo de vida y cuenten con las bases necesarias para ofrecer calidad en sus productos o servicios y con ello logren la supervivencia en el mercado.

La afectación que tuvo la actividad turística durante el año 2020 debido a la pandemia Covid-19, como la baja demanda de turística, el desempleo, cierre de negocios, bajos ingresos, ocasionado por los diferentes

periodos de confinamiento, trae un nuevo efecto en la resiliencia ante la nueva normalidad, basados en un turismo nacional que permita el levantamiento de la actividad turística, la capacidad de adaptación de protocolos de bioseguridad y nuevos estilos de viajes. Por lo anterior resulta importante preguntarnos ¿cuál es la situación actual de los componentes e interrelaciones en la gestión de la calidad de las microempresas restauranteras en destinos con vocación turística?

Los retos que trajo consigo esta nueva normalidad, se ve reflejada a través de distintos estilos de vida y procesos de globalización e hiperglobalización social, económica y cultural, en distintos aspectos, la adaptación, nueva información, digitalización e innovación, redireccionado la evolución de la calidad tanto en los productos del mercado (bienes tangibles), como dentro de los servicios (bienes intangibles). Lo cual nos invita a reflexionar acerca de las expectativas de los consumidores, visualizando desde una perspectiva más amplia lo que está pasando en el mundo, por medio de estudios de consumo y de mercado, así como los nuevos estilos de vida y hacia dónde se dirige la industria turística, como lo son las diferentes tendencias que se desarrollan dentro del sector restaurantero (véase Tabla 1).

TABLA 1
LISTA DE TENDENCIAS EN LOS RESTAURANTES [3].

Nombre de la tendencia restaurantera
Gastronomía de todo el mundo en una sola ciudad
Cocinas tradicionales y populares (<i>Mexican flavours</i>)
La gastronomía como atractivo turístico
Cocina de autor
Estetización de la gastronomía
Gastronomía saludable
<i>Foodies</i>
Servicio de entrega (<i>Delivery</i>)
Comedor asequible (<i>Affordable dining</i>)
Comida asiática (<i>Asian take over</i>)
Al centro de la mesa (<i>Small plates</i>)
Platillos instagramables (<i>Design for Instagram</i>)
Fuente. Adaptado de [3].

La gestión de la calidad en alimentos y bebidas se desarrolla y evoluciona con la elaboración de nuevos alimentos o recetas que dan identidad al lugar donde son ofertados. También innova con base en las necesidades del cliente, estas son algunas razones por las cuales las empresas de alimentos y bebidas se ajustan a los requerimientos actuales del turismo y la calidad del servicio adquirió un nuevo papel de gran importancia.

De ahí surge el interés por parte de las empresas hacia la certificación de la calidad de los servicios que ofertan, convirtiéndose en un proceso de mejora continua en el cual ya no solo se involucra el cliente sino los integrantes de la organización [4]. Esta idea se perfeccionó a lo que los tradicionalistas y pioneros de estudios de calidad mencionan como difícil de conceptualizar, la calidad en el servicio, ya que la misma se adecua a las percepciones de los clientes a diferencia de los productos [5]. Oliver [6] menciona que la evaluación de calidad se realiza *a posteriori*, como estrategia de diferenciación y como ventaja competitiva para muchas empresas [7]. Sin embargo, Park et al. [8] refieren la importancia de analizar las distintas etapas del proceso de la prestación de un servicio para entender la calidad del mismo. Grönroos [9], enfatiza una doble dimensión de calidad, una técnica y otra funcional, por lo que basado en ello evidencia la existencia de la satisfacción como variable mediadora de la calidad y la lealtad [7]. Lo cual lleva a la visión de la calidad desde otro enfoque, como lo es el *marketing* [4], [10], en donde visualizan la multidimensionalidad de la calidad del servicio de acuerdo con los diferentes contextos en los que se aborda. Otros autores Qiu et al. [11], Bandura et al. [12], Carter et al. [13] y Jude et al. [14] consideran relevante el enfoque organizacional relacionado con desempeño de los empleados como parte de la calidad interna y externa de la empresa.

Si bien es cierto que la calidad continúa estudiándose, en sus diferentes perspectivas y aspectos adecuados a cada sector, en el área turística y enfocado al área de los alimentos y bebidas de un destino turístico existen pocos programas de calidad que se encargan de poder estandarizar las prácticas en diferentes aspectos.

II. METODOLOGÍA

Este trabajo de investigación toma como base el *Paradigma Sistémico*, el cual nos genera una síntesis dialéctica entre los paradigmas positivistas y naturalistas [15], [16]. Asimismo, el Paradigma Sistémico nos ayuda a obtener un mejor entendimiento ante la dinámica del turismo como fenómeno, pero sobre todo la actividad de los servicios de alimentos y bebidas dentro de los lugares turísticos con una perspectiva global, la identificación de sus componentes y la interpretación de sus interrelaciones [15]. Para desarrollar el Paradigma Sistémico en este trabajo, se hace uso de la Metodología de Sistemas Suaves (MSS) en sus fases de diagnóstico. La adecuación de la MSS a la investigación nos lleva a la revisión de sus fundamentos.

La Metodología de Sistemas Suaves fue creada por Peter Checkland con base en sus investigaciones en la Universidad de Lancaster sobre cómo aplicar el pensamiento de sistemas duros a sistemas sociales y administrativos, con la aplicación de la misma en un gran número de proyectos de la industria, llegando a su refinamiento años después [17].

Esta metodología flexible en la aplicación y secuenciación de sus fases articula de forma participativa la visión, interpretación y conocimientos del mundo real (expertos prácticos) y el pensamiento sistémico (expertos teóricos). Su estructura es una red no lineal iterativa que relaciona todos los pasos de la metodología, empleándose para el diseño de organizaciones socio técnicas abiertas, con un alto grado de complejidad [18].

La Metodología de Sistemas Suaves se basa en el paradigma del aprendizaje y principalmente de cuatro sistemas para identificar cuatro actos mentales. Percibir, formular, comparar y decidir a través de una organización donde nada es independiente. Esta metodología consta de distintas etapas bajo una secuencia lógica identificando el mundo real con el pensamiento sistémico [15]. En la Fig. 1 se pueden apreciar estas etapas de manera gráfica.

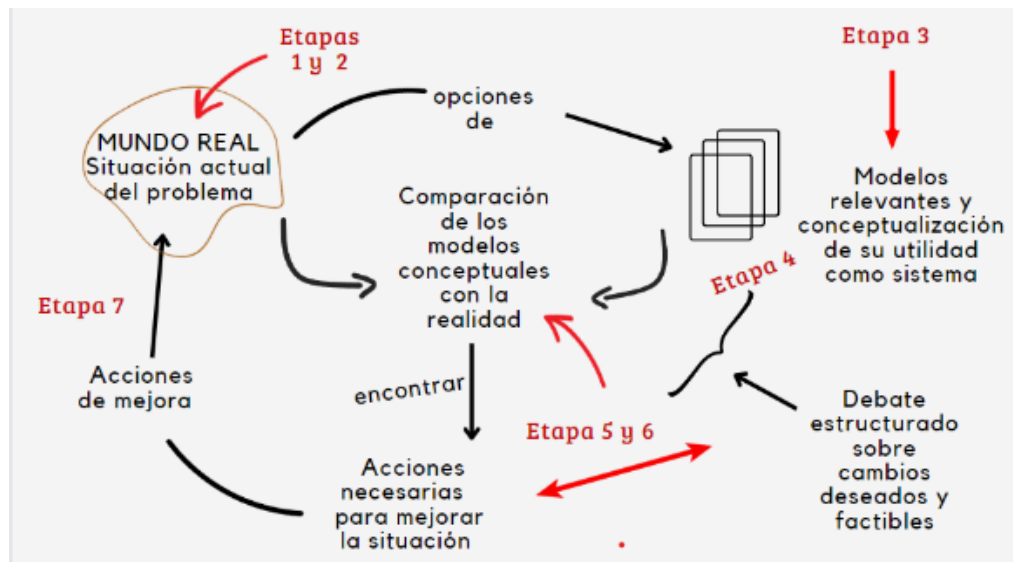


Fig. 1. Metodología de Sistemas Suaves, adaptado de [17].

De manera descriptiva las fases de la MSS son:

Fase 1: Situación problema no estructurada. Fase de la metodología que consiste en reconocer una “situación problema” o bien la posibilidad de una mejora, dando inicio el análisis y la investigación de la situación. Durante ella se inicia la delimitación del sistema y se comienza a definir su entorno [19].

Fase 2: Situación problema expresada. Durante esta fase se obtiene, clasifica y se describe la situación problema, procurando identificar los actores, funciones y situaciones claves, es decir, la estructura de la organización, procesos, interrelaciones o transformaciones que se realizan dentro del sistema, expresados o percibidos a través de los miembros de organización. Lo anterior debe ser expresado mediante diagramas “visiones enriquecidas” [19].

Fase 3: Definición raíz. El objetivo de este paso es llegar al problema raíz para poder estudiar al sistema, teniendo en cuenta para ello los elementos del acrónimo CATWOE (en inglés) Cliente, Actor, Transformación, *Weltanschauung* (en inglés) o visión del mundo, Dueño y Entorno o Ambiente. Las definiciones raíz se estructuran en forma de oraciones que permiten una transformación, correspondientes a una visión de la situación. En otras palabras, una definición raíz las cuales pueden tomarse como hipótesis mediante las cuales el problema puede ser solucionado a través de cambios que resulten viables y deseables [19].

Fase 4: Elaboración de modelos conceptuales. A partir de las definiciones raíz elaboradas en la fase anterior se construye un modelo de estructura conceptual, que permite llevar a especificar una “definición raíz”, definiendo “cómo” a través de la construcción del modelo a través de las actividades que son necesarias para lograr una transformación. Con el fin de comprobar su viabilidad, este modelo deberá ser comparado con el modelo formal o bien cualquier sistema de pensamiento válido.

Concepto de sistema formal: Se usa para verificar que los modelos no sean deficientes y consiste en el uso de un modelo general del sistema. Otro pensamiento de sistema: Consiste en la transformación de un modelo, obtenido por un enfoque con pensamiento sistémico [19].

Fase 5: La comparación de los modelos conceptuales con la realidad (fase 4 con la 2). Durante esta etapa, de la metodología se lleva a cabo una comparación de los modelos conceptuales con el mundo real. Revelando sus diferencias, para cambiar de acuerdo con la realidad del sistema dentro del modelo conceptual [19].

Fase 6: Cambios deseables viables. En este punto de la metodología, se deben de identificar y discutir aquellos cambios emergidos que sean factibles y deseables, los cuales deben ser evaluados y aprobados por los principales actores que componen el sistema. Debido a la naturaleza del sistema los cambios por lo general se presentan en tres ámbitos: en la estructura, en el procedimiento y en la actitud [19].

Fase 7: Implementación de cambios. Fase final de la metodología, en la que se ponen en acción aquellos cambios que previamente se discutieron y acordaron. Por supuesto su implementación tendrá efectos en el sistema que pueden ser inmediatos o bien tomen algún tiempo en manifestarse y estos podrán ser positivos o negativos, por lo que es conveniente considerar la periódica reevaluación del sistema con el fin de lograr una mejora continua en conceptualización y cambios [19].

De estas fases, en la investigación se desarrollaron las primeras tres con el fin de definir y visualizar el sistema con su problemática existente de las microempresas restauranteras con vocación turística. Así como lograr identificar a los actores interpretar sus interacciones dentro del sistema y finalmente poder establecer las bases de los sistemas relevantes con la realización de la nemotecnia CATWOE.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema bajo estudio muestra cuatro niveles, que del centro al exterior se vinculan con las microempresas restauranteras de destinos de vocación turística. A través de este sistema sociotécnico abierto podemos visualizar los componentes del sistema y su entorno (véase Fig. 2). En el primer nivel se integran aquellos elementos relevantes de las microempresas, desde el propietario, el gerente, el personal operativo y administrativo, los proveedores y por su puesto el cliente, actores que serán fundamentales para las interrelaciones con los demás niveles y que servirán de apoyo para poder validar las acciones pertinentes de retroalimentación dentro del sistema en foco.

El segundo nivel está constituido por los componentes con el medio local a través de las instituciones municipales que, apoyadas de los residentes y la economía, permiten el desarrollo de las distintas actividades turísticas que se ofertan dentro de un destino tanto en el sector público y privado. El tercer nivel se apoya del nivel nacional que tiene la actividad turística dentro de un destino para poder ofrecer sus servicios apoyados de las distintas asociaciones públicas y privadas, con el fin de regularizar las actividades que se estandarizan por medio de las normas mexicanas y las distintas herramientas para el control de calidad (*servqual*, *hotelqual* por mencionar algunas).

El último nivel pretende visualizar la regularización de las microempresas, de manera nacional a través de las distintas instituciones que ofrecen sus servicios. Las normatividades que atienden este nivel como ejemplo las normas ISO, así como el plan nacional de desarrollo. Por último, se muestran los problemas que de manera indirecta afectan al sistema, como la emergencia sanitaria mundial ocasionada por Covid-19, actores político-sociales y culturales que, dentro de un sistema de orden superior, están en relación con algunos sistemas o subsistemas de orden inferior, entendido como supra sistema, que enlaza diferentes tipos de comunicación interna y externa en un conjunto de interacción mutua.

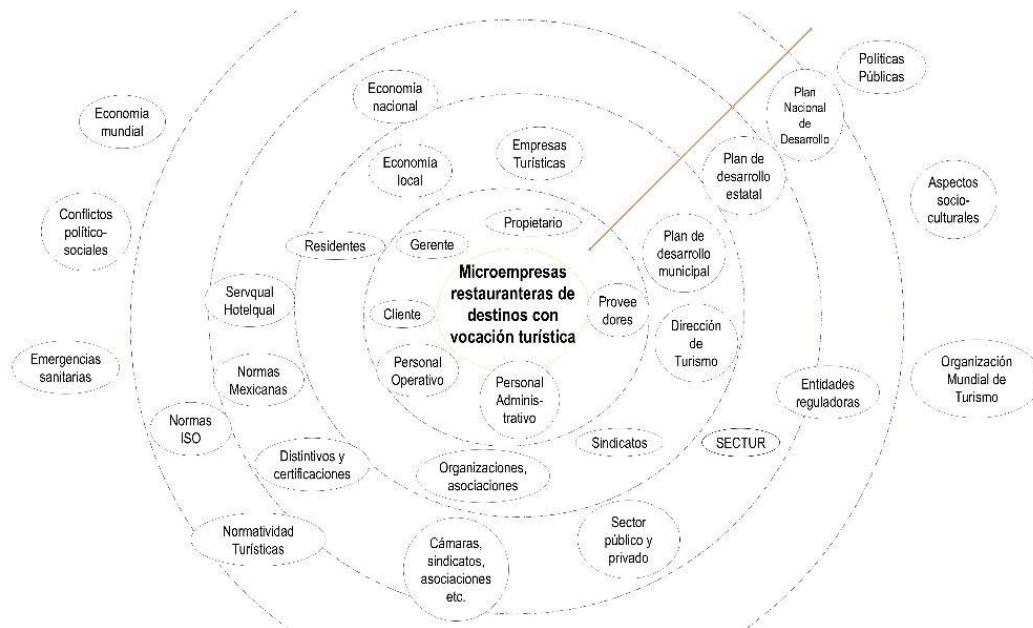













Fig. 2. Sistema bajo estudio.

El desarrollo de la fase dos de la MSS representa la expresión del problema con la interpretación de la interacción de los elementos bajo estudio, para visualizar donde se encuentran áreas de oportunidad o mejora dentro del sistema, así como para la definición y organización de los sistemas relevantes (véase Tabla 2).

TABLA 2
ELEMENTOS DEL SISTEMA.

ÍCONO	ELEMENTO	ÍCONO	ELEMENTO
	Economía Turística		Gerente
	Estructura organizacional		Organización
	Proveedores		Competencia directa
	Personal Administrativo		Personal operativo
	Sector Público y Privado		Satisfacción del cliente
	Conflictos Sociopolíticos		Planeación estratégica
	Microempresas restauranteras		Capacitación y Formación

8

	Cámaras y asociaciones de apoyo		Certificación y distintivos turísticos
	Cliente		Relación de conflicto
	Tendencias del sector restaurantero		Relación interrumpida
	Información		Relación buena
	Materia		Comunicación
	Energía		

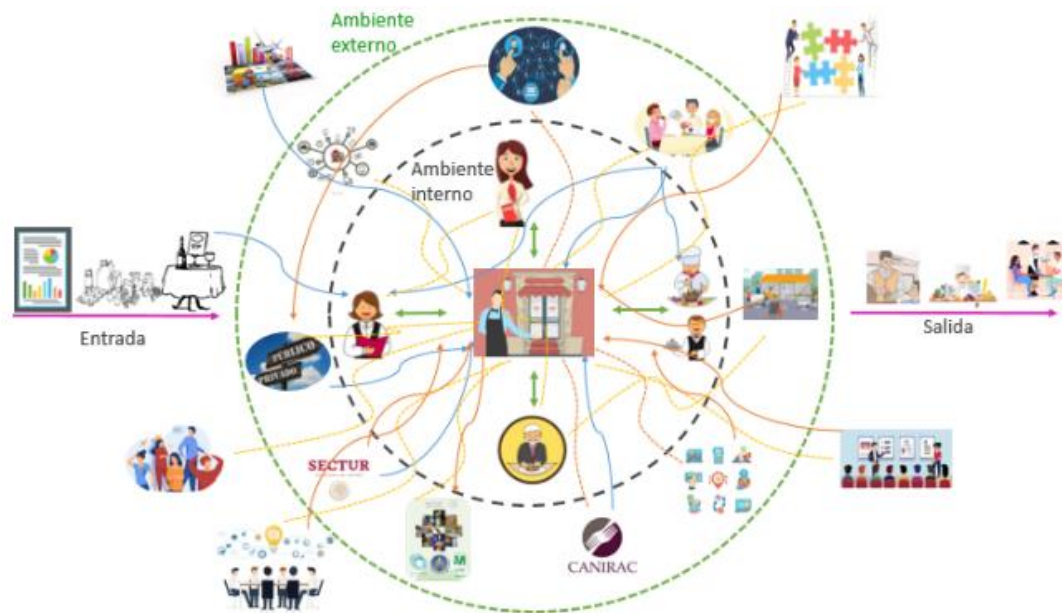


Fig. 3. Visión rica del sistema.

La visión rica del sistema (véase Fig. 3) nos permite identificar los sistemas relevantes que constituyen el modelo de transformación de nuestro sistema a través de los elementos de entrada y salida así mismo, apoya en la interpretación de las interrelaciones de los actores. De tal manera que podemos identificar qué tipo de interrelación presentan los actores en el sistema donde se desenvuelven, con el fin de observar las áreas de oportunidad de las microempresas y su entorno, así como la organización de estas y los procesos administrativos y de planeación que deben mejorarse.

Se identifica que las microempresas muestran mayor interrelación con su ambiente interno o próximo pero a medida en que se va extendiendo se va perdiendo la comunicación entre sus actores, por tal motivo, podemos visualizar que los factores del contexto afectan de manera intermitente a la actividad misma que estas realizan dentro del su destino turístico, pues al afectar al fenómeno en sí, afectan a todos sus actores, de tal modo que se tiene una conexión intermitente con el cliente que es quien califica la calidad percibida dentro de un establecimiento.

En el centro se encuentran las microempresas restauranteras con vocación turística, las cuales mantienen relación con su personal operativo y administrativo, su gerente y los clientes que son los que se benefician de las acciones de los colaboradores de la empresa. Estos actores mantienen una relación positiva entre sí, misma que se ve afectada al ingresar al sistema un nuevo colaborador, mientras que el mismo se adapta al espacio de trabajo, es capacitado y se pone al tanto de clientes y proveedores con los que trabaja el sistema en foco.

En el siguiente nivel se encuentran las interrelaciones que las microempresas tienen con los proveedores que apoyan a la empresa para su normal funcionamiento. En este nivel también se encuentran el sector público y privado, con una relación interrumpida con las cámaras y asociaciones de apoyo por parte de los programas de turismo a nivel nacional, que oferta la SECTUR. Adicional a ello la competencia directa e indirecta, las tendencias del mercado a las que se enfrentan las microempresas constantemente para poder sobrevivir ante los cambios del mercado.

En la parte exterior está el ambiente externo conformado por los conflictos externos al sistema que afectan de alguna manera su funcionamiento. Los conflictos sociopolíticos como los cambios de gobierno, los ecológicos, ante la falta de regularización turística, los de salud, como la pandemia pasada y los económicos en conjunto influyen en el buen o mal funcionamiento del sistema para poder lograr una buena organización y la satisfacción de los clientes (véase Tabla 3).

TABLA 3
SÍNTESIS DE CONFLICTOS ENTRE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.

Elemento	Conflicto
Economía Turística	Genera una afectación a las microempresas de acuerdo con su estado
Estructura organizacional	Falta de organización en las microempresas
Proveedores	Pueden tener una buena relación con la microempresa, hasta que esta deja de poder solventar sus gastos
Personal Administrativo	Debe interrelacionarse con sus compañeros para hacer funcionar el sistema
Sector Público y Privado	La mediana comunicación que se llega a tener con los sectores
Conflictos Socio-Políticos	La afectación que estos tienen para con el sistema
Cámaras y asociaciones de apoyo	Las ventajas y desventajas que ofrecen a las microempresas
Cliente	Es quien determina las relaciones que la microempresa puede llegar a tener en un entorno
Tendencias del sector restaurantero	La búsqueda de innovación y la falta de la misma determina la estadía de la microempresa en el mercado
Gerente	Debe de ser quien realice la mayor parte de la comunicación con el ambiente interno y externo de la microempresa
Competencia directa	Apoyan al crecimiento y benchmarking de las microempresas del mismo giro
Personal operativo	Es quien ofrece el servicio y muestra la imagen de la microempresa con el cliente
Satisfacción del cliente	Se basa en la experiencia que este recibe y percibe dentro del establecimiento
Planeación estratégica	La falta de planeación hace que las microempresas no muestren las relaciones necesarias con el mercado para sobrevivir
Capacitación y Formación	Al no existir de manera regular dentro de la microempresa se pierden procesos y los objetivos de la misma
Certificación y distintivos turísticos	Deben apoyar y complementar los servicios que ofrecen las microempresas al entorno.

El objetivo de la definición raíz, tal como el título lo dice, es llegar al problema raíz para el estudio dentro del sistema teniendo en cuenta para ello los elementos del acrónimo CATWOE (en inglés) Cliente, Actor, Transformación, Cosmovisión o visión del mundo, Propietario y Entorno.

Las definiciones raíz se estructuran de tal forma que permitan una transformación, correspondientes a una visión actual de la situación. En otras palabras, una definición raíz puede tomarse como hipótesis mediante las cuales el problema puede ser mejorado a través de cambios que resulten viables y deseables [19]. En ella se describe los actores que participarán dentro del proceso, así como la visualización de los cambios a realizarse con el fin de generar una mejora continua y elucidar los sistemas relevantes.

CATWOE

Cliente: Son aquellos usuarios que se beneficiaran con el presente trabajo de investigación.

1. Microempresas de restauranteras

Actores: Componentes que apoyaran a la transformación de los elementos de entrada en las salidas.

1. Propietarios de microempresas
2. Cliente interno (personal operativo)
3. Proveedores a las microempresas

Transformación: Proceso de transformación que se llevará a cabo (véase Fig. 4).

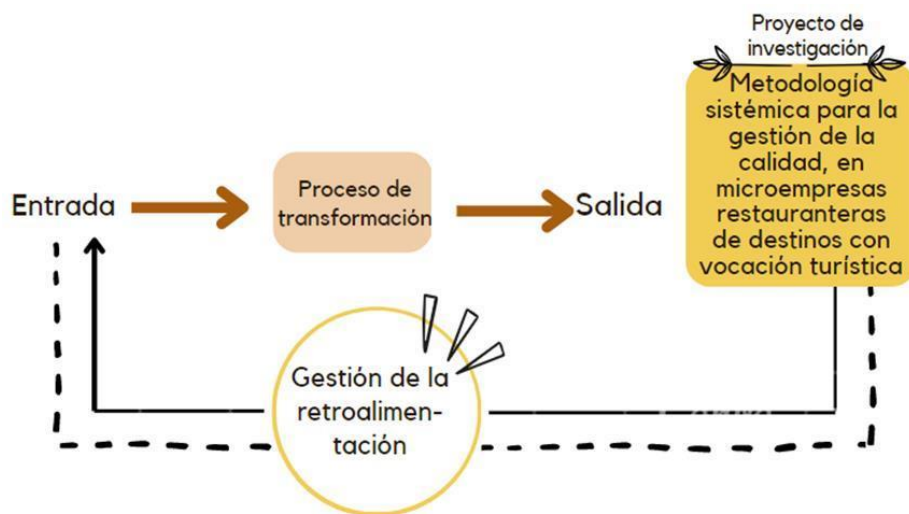


Fig. 4. Proceso de transformación.

Cosmovisión o visión del mundo: Visión positiva y negativa de los actores involucrados (véase Tabla 4).

TABLA 4
WORLDVISION.

Actor	Visión Positiva	Visión Negativa
Propietario	Aportación y continuidad al proyecto	No realiza cambios o ajustes de acuerdo al contexto o mercado
Gerencia	Atiende las necesidades del cliente interno y externo	No recibe la adaptación o retroalimentación por parte de los demás actores
Cliente interno (personal)	Regula las actividades para que la empresa funcione adecuadamente	La realización adecuada de sus tareas es ineficiente y no recibe la capacitación constante que requiere
Proveedores	Atienden las solicitudes de la microempresa	Falta de comunicación e interacción para surtir productos al cliente.

Propietario: Actores del sistema que tomaran e implementaran decisiones.

1. Dueños de microempresas

Entorno: Aquello que permitirá o no la implementación de nuevos cambios dentro de la microempresa.

1. Cámaras o Asociaciones
2. Empresas gubernamentales turísticas

El desarrollo de esta investigación utilizando la MSS, a través de sus etapas diagnósticas, permite una reflexión integral de las microempresas restauranteras con destinos de vocación turística interpretando su dinámica como organización, para comprender los problemas a los que se enfrenta y posteriormente poder diseñar un constructo que apoye en la evaluación de sus procesos de calidad para su mejoramiento continuo e integral y mantener su subsistencia en equilibrio con su entorno [7].

Basado en la determinación de las bases de los sistemas relevantes, se puede visualizar que la calidad en el servicio es un factor determinante dentro de las microempresas de alimentos y bebidas en destinos con vocación turística. La globalización, la incorporación de nueva tecnología, de técnicas y procesos contribuyen en la renovación y restructuración de los establecimientos desde su infraestructura, personal, hasta sus menús [20]. Actualmente, muchas empresas están enfocadas en la mejora continua [4], las empresas del sistema bajo estudio requieren fortalecer la calidad de los servicios que ofrecen, puesto que el cliente es quien evalúa, sin embargo no deben dejar de lado la relevancia del cliente interno [11], quien colabora en la organización con el fin de tener una buena productividad, rentabilidad y hasta una buena competitividad con respecto a otros negocios [21].

La gestión de la calidad ha tenido gran importancia de manera nacional y también internacional por lo que han surgido organizaciones que normalizan y ofrecen servicios para mejorar la misma a través de distintos enfoques dentro de las organizaciones [10], tal es el caso de la ISO (por sus siglas en inglés), sin embargo, las empresas estudiadas no tienen acceso a estos procesos de normalización, por lo que requieren el apoyo a sus requerimientos y capacidades. Lo cual lleva a mirar hacia la organización y los procesos que se realizan dentro de ella para después poder ofrecer de manera satisfactoria a sus clientes un buen servicio, por medio de la evaluación y con ello gestionar la retroalimentación y motivar al personal [12], [14] para continuar con la prestación de estos servicios [22], [23].

IV. CONCLUSIONES

La investigación realizada bajo el Paradigma Sistémico con la Metodología de Sistemas Suaves, permitió comprender la situación actual que enfrentan las microempresas restauranteras en destinos con vocación turística. Lo anterior genera las bases para construir un modelo que evalúe sus procesos de calidad con vista de lograr una mejora continua que permita su permanencia dentro del mercado en el contexto actual. La revisión de literatura, permitió observar que, hasta el momento, no existen investigaciones que aborden la calidad en el servicio en empresas restauranteras con perspectiva sistémica, y tampoco se encontraron investigaciones enfocadas a microempresas restauranteras en destinos con vocación turística.

El desarrollo de la metodología identificó e interpretó dentro del sistema los actores y sus interrelaciones, así como algunas anomalías en las relaciones de las microempresas restauranteras con respecto a la formación y capacitación de la calidad en el servicio. También la falta de vínculo entre las microempresas restauranteras con organizaciones gubernamentales, cámaras o asociaciones empresariales. Por su parte el CATWOE mostró las bases de la realización adecuada de las tareas de cada uno de los actores del sistema para que pueda lograr una transformación con la integración de los sistemas relevantes.

Al desarrollar esta investigación se acerca a la interpretación holística del estudio de la situación actual de las microempresas de restauranteras con vocación turística, para ir configurando un modelo que genere una repercusión desde las acciones que emergen del desarrollo de una perspectiva sistémica, que permita identificar

las necesidades de las microempresas encargadas de la elaboración de alimentos y bebidas, con el fin de evaluar y mejorar la calidad del servicio que ofrecen.

Como investigación futura se tiene el completar las etapas de la MSS para configurar un modelo conceptual que retome el trabajo diagnóstico generado. Posteriormente, contrastar el modelo con la realidad para definir las acciones factibles que contribuyan con la mejora e innovación de los servicios de las microempresas restauranteras en armonía con el contexto actual.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de la CDMX, por el apoyo brindado.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Turismo, “Celebra la gastronomía mexicana diez años de ser Patrimonio Inmaterial de la Humanidad”, 2020. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/sectur/prensa/celebra-la-gastronomia-mexicana-diez-anos-de-ser-patrimonio-inmaterial-de-la-humanidad-257259?idiom=es> [Último acceso: 2021 11 01].
- [2] INEGI, *La industria restaurantera en México, Censos Económicos*, México: INEGI, 2014.
- [3] A. López-Ojeda, C. Pérez-Camacho, C. Guzmán-Hernández, R. Hernández-López, “Caracterización de las principales tendencias de la gastronomía mexicana en el marco de nuevos escenarios sociales”, *Teoría y Praxis*, no. 21, pp. 91-113, 2017.
- [4] M. A. López Fernández, A. M. Serrano Bedia, “Dimensiones y medición de la calidad de servicio en empresas hoteleras”, *Revista Colombiana de Marketing*, vol. 2, no. 3, 2001.
- [5] A. Parasuraman, V. Zeithalm, L. Berry, “A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research”, *Journal of Marketing*, no. 49, pp. 41-50, 1985.
- [6] R. Oliver, “Measurement and Evaluation of Satisfaction Processes in Retail Settings”, *Journal of Retailing*, no. 47, 1981.
- [7] G. T. Bradley, W. Wei, “Development and validation of a casino service quality scale: A holistic approach”, *Tourism Management*, vol. 88, 2022.
- [8] S. Park et al., “Understanding the dynamics of the quality of airline service attributes: Satisfiers and dissatisfiers”, *Tourism Management*, vol. 81, 2020.
- [9] C. Grönroos, “A Service Quality Model and its Marketing Implications”, *European Journal of Marketing*, vol. 18, no. 4, pp. 36-44, 1984.
- [10] M. Losada Otálora, A. Rodríguez Orejuela, “Calidad del servicio de salud: una revisión a la literatura desde la perspectiva del marketing”, *Cuadernos de Administración*, vol. 20, no. 34, pp. 237-258, 2007.
- [11] Q. Shaoping et al., “How servant leadership and self-efficacy interact to affect service quality in the hospitality industry: A polynomial regression with response surface analysis”, *Tourism Management*, vol. 78, 2020.
- [12] E. Bandura et al., “Revisión de la autoeficacia negativa y los efectos de las metas”, *Revista de Psicología Aplicada*, no. 88, pp. 87-89, 2003.
- [13] L. Carter et al., “The effects of employee engagement and self-efficacy on job performance: a longitudinal field study”, *The International Journal of Human Resource Management*, vol. 29, 2018.
- [14] T. A. Judge et al., “Self-efficacy and work-related performance: The integral role of individual differences”, *Journal of Applied Psychology*, vol. 92, pp. 107-127, 2007.
- [15] R. Tejeida Padilla, E. Cruz Coria, A. Briones Juárez, *Sistémica y turismo*, México: Miguel Ángel Porrúa, 2016.
- [16] I. Badillo, R. Padilla Tejeida, O. Matamoros Morales, “Toward a System Science Structure”, *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the ISSS-2011*, pp. 148-167, 2011.
- [17] P. Checkland, *Systems thinking, systems practice Soft systems methodology*, Universidad de Michigan: John Wiley, 1999.
- [18] I. Peón, *Metodología de Sistemas. Apuntes de clase*, 2015.
- [19] P. Checkland, J. Scholes, *La metodología de sistemas suaves en acción*, México: Limusa, 1994.
- [20] A. Guzmán López, M. Cárcamo Solís, “La evaluación de la calidad en el servicio”, *Acta Universitaria*, vol. 24, no. 3, pp. 35-49, 2014.

- [21] A. Larios, A. González, “La calidad del servicio interno en el sector hotelero: objeto e instrumento estudio multidisciplinar”, *Teoría y Praxis*, no. 22, 2017.
- [22] J. M. Cadena Badilla, A. Vega Robles, I. Real Pérez, J. Vázquez Quiroga, “Medición de la calidad del servicio proporcionado a clientes por Restaurantes en Sonora”, *Ingeniería Industrial*, vol. 5, no. 17, pp. 41-60, 2016.
- [23] M. L. Rodríguez Escalona, *Método para el desarrollo de un sistema de evaluación de calidad en el servicio al cliente en microempresas restauranteras en la CDMX*, México: IPN, 2020.

Aplicación del modelo TSP en la planificación de rutas de una empresa de servicio de limpieza

TSP Model to Route Planning in a Cleaning Services Company

Marlenne Cruz Romero¹, Jenaro Nosedal Sánchez², Danae Abodón Lira³
Jeddiel Gabriel Chavez Talavera⁴, José Aparicio Urbano⁵

Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0003-4908-0032> | marlenne.cruz@tesjo.edu.mx

³<https://orcid.org/0000-0001-8178-9485> | 2018150480001@tesjo.edu.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0003-1970-9178> | 2018150480155@tesjo.edu.mx

⁵<https://orcid.org/0000-0002-7488-3323> | jose.aparicio@tesjo.edu.mx

Universidad Autónoma de Barcelona, ESPAÑA

²<https://orcid.org/0000-0002-7199-4474> | Jenaro.Nosedal@uab.cat

Recibido 24-08-2022, aceptado 14-12-2022.

Resumen

Este trabajo se desarrolló para apoyar la toma de decisiones de una empresa de servicios. La empresa bajo estudio brinda el servicio de limpieza residencial y comercial y se ubica en San Diego CA, el inicio de sus operaciones data desde el año 2008. Actualmente la empresa no cuenta con herramientas cuantitativas para el análisis o la planificación de rutas en su operación, por lo tanto, tiene el potencial de ser optimizada para mejorar su eficiencia o ampliar su capacidad actual para atender los servicios demandados. Se propone como herramienta de mejora el desarrollo y solución de un modelo para resolver una instancia correspondiente a la aplicación del modelo Travelling Salesman Problem-Problema del agente viajero (TSP) que implica un nodo origen y n nodos destinos de procesamiento fijos de modo que haya una asignación de un servicio de limpieza para cada nodo y que cada nodo sea visitado solamente una vez a excepción del origen.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar un potencial de mejora en cuanto a los tiempos de ejecución de las actividades de la empresa ya que el porcentaje de reducción fue del 32%, resultado que evidencia el beneficio en cuanto a un mejor aprovechamiento de la capacidad actual de la empresa para atender los servicios demandados, y eventualmente dicha capacidad adicional (obtenida por la optimización) se podría asignar para atender los servicios no programados sin necesidad de incurrir en mayor contratación o bien aumentar la cobertura de demanda programada con los mismos recursos operativos (personal y vehículos).

Palabras clave: diseño de rutas de transporte, problema del vendedor viajero, optimización de procesos, dirección de operaciones.

Abstract

This work is developed to support the decision-making of a service company. This company provides residential and commercial cleaning services. The company is located in San Diego CA. and the beginning of its operations was in 2008. Currently the company does not have a quantitative tool for the analysis or planning its routes, therefore it has the potential to optimized and improve its efficiency or expand its current capacity to respond the services demanded. The development and solution of a model proposed in this work is a solution to solve an instance corresponding to the application of the TSP model that implies a fixed origin and n processing destination nodes, there is a designed cleaning service for each node and that each node has to be visited only once except for the origin. According to the results, it was possible to identify a potential for improvement in terms of the execution times of the company's activities of 32% (percentage reduction), the result shows the benefit in terms of better use of current capacity of the company to meet the demanded services, and eventually additional capacity (obtained by optimization) could be assigned to meet non-scheduled services without the need to incur greater hiring or increase coverage of scheduled demand with the same operating resources (personal and vehicles).

Index terms: transport route design, traveling salesman problem, process optimization, operations management.

I. INTRODUCCIÓN

El problema del vendedor viajero (TSP) trata de visitar n ciudades pasando una y sólo una vez, iniciando en un origen y regresando al mismo nodo de origen con la finalidad de que la visita sea de costo mínimo (Cij). A través de la minimización de la distancia total recorrida o en el menor tiempo total de recorrido. El TSP es uno de los problemas más famosos y estudiados en su área.

El TSP también es conocido como un problema de optimización combinatoria que a pesar de su facilidad de formulación pertenecerá a la clase de problemas de optimización combinatoria que son difíciles de resolver [1], este puede ser aplicado en diferentes situaciones como transporte y entrega, recolección de datos y conectividad en redes, búsqueda y rescate, logística humanitaria, manejo en la producción de cultivos en la agricultura, monitoreo y vigilancia, asignación y programación de tareas a Robots y aplicaciones militares en misiones cooperativas entre robots, vehículos y drones.

Algunas aplicaciones del TSP se describen a continuación:

En [2] se presentan técnicas heurísticas de optimización para la solución del problema del agente viajero (TSP), las técnicas contemplan: algoritmos genéticos, recocido simulado, colonia de hormigas, búsqueda Tabú y Grasp. Para el problema planteado que contempla 8 nodos se encuentra la solución óptima a través de todas las heurísticas planteadas. Los autores recomiendan que los algoritmos que ofrecen más ventajas son colonia de hormigas, recocido simulado y búsqueda Tabú debido al menor número de iteraciones realizadas y la facilidad de implementación.

En [3] se destaca la importancia de atender a la logística de recolección de residuos debido a los costos que se generan a la hora de la recolección y por el aumento en los volúmenes de residuos generados que impacta directamente al medio ambiente. En este trabajo se modela el problema del agente viajero (TSP) para obtener la ruta de recolección que toma en consideración la capacidad del vehículo, 208 nodos y 355 arcos, posteriormente se aplica el algoritmo de optimización por colonia de hormigas para la obtención de resultados y el logro del objetivo el cual es la minimización de la distancia total recorrida.

En [1] se reporta la programación de ruta óptima en la gestión de la construcción mediante el uso de la solución del problema del vendedor viajero, el modelo TSP desarrollado considera la visita de un supervisor a quince sitios de construcción, condicionando que cada sitio de construcción debe ser visitado dos veces a la semana, también un día hábil en la semana está dedicado a trabajos de oficina mientras que los cuatro restantes son dedicados a la supervisión de los sitios de construcción. La jornada laboral es de ocho horas y el tiempo considerado para cada visita de supervisión es de 30 minutos, además de que se reservan 30 minutos al día para comer.

En [4] se expone que la demanda de los clientes se atiende con un adecuado diseño de las redes de distribución ya que impacta directamente en la eficiencia y capacidad de la empresa para satisfacer las exigencias de los consumidores. En su trabajo aplica el modelo TSP para la optimización de una ruta de distribución a través de la minimización de la distancia entre el proveedor y los clientes en una empresa empackadora de especias. El estudio involucra el uso de un solo vehículo y la visita a 37 clientes en un mismo día desde el centro de distribución. El objetivo es que un agente visite a los clientes desde el centro de distribución y regrese al mismo para finalizar el recorrido de tal forma que lo haga con la menor distancia total recorrida.

Investigaciones más recientes, como la reportada en [5], ilustra el uso de un algoritmo genético para la obtención de la distancia mínima recorrida. En donde se considera que un algoritmo genético es una técnica de optimización que se adapta al proceso genético de organismos biológicos basado en la teoría de evolución de Charles Darwin.

En [6] se realizó un estudio para elegir la ruta más óptima y que aspectos interfieren para elegir el punto de partida, apoyados en el software O-Mopsi que combina la ubicación, el recorrido con la resolución de

problemas. Se analizaron 25 posibles puntos de inicio mediante el uso del método TSP para calcular el punto de partida que lograra cumplir todos los objetivos y que fuera el más corto.

A medida que se incrementa el número de nodos a la matriz del TSP este va teniendo innumerables formas para solucionar la ruta más óptima. En [7] se realizaron una serie de experimentos en donde concentraron sus objetivos en la relación entre el tiempo de solución del TSP al incluir matrices de entre 10 y 120 nodos.

En [8] incorporaron el modelo TSP para disminuir la problemática de los tiempos de servicio al momento de la entrega. Este estudio se realizó mediante la comparación del método manual y el TSP, en donde se evaluó el tiempo de duración del recorrido, la distancia y el total de nodos a visitar, se concluyó que al implementar el modelo TSP se reducía en un 20% la distancia total recorrida, así como los tiempos cuando se visitaban más de 6 nodos.

En [9] se menciona que los algoritmos que se pueden utilizar para resolver el problema TSP son muchos y muy variados, lo que en varias ocasiones dificulta saber cuál método tomar, por estas razones debemos de considerar el uso de redes neuronales para poder resolver el TSP de manera más rápida, eficiente, pero sobre todo autónoma, ya que no siempre se seguirá el mismo patrón de nodos, estos mismos pueden cambiar. Nos hace mención de diferentes métodos de aplicación los cuales son: aprendizaje profundo y combinarlo con el aprendizaje de refuerzo y otros algoritmos para resolver el TSP.

Finalmente, los autores citados en [10] analizan la literatura relevante sobre el TSP en términos de contenidos, clases y campos de aplicación, asimismo realizan una descripción de las publicaciones más citadas que abordan como eje central el TSP, complementariamente.

En este trabajo se propone desarrollar e implementar la modelación matemática del TSP adaptada al caso de estudio para la minimización de distancia total recorrida. La minimización del recorrido entre el punto de origen y los servicios demandados representará una oportunidad de ahorro en combustible y además incrementará la capacidad de respuesta de la empresa.

II. DESARROLLO

El presente trabajo se desarrolla en tres etapas, en primer lugar, se describe el problema, se propone el modelo matemático y finalmente se describe la experiencia computacional.

A. Descripción del problema

El área de mejora que se estudió en este trabajo se relaciona con la minimización de la distancia total recorrida al tiempo que se atiendan todos los servicios demandados por los clientes.

Actualmente se cuenta con información sobre la calendarización de servicios demandados de cinco días. La información disponible es sobre el orden en que se realiza el servicio y la hora agendada para realizar el servicio.

Una vez que se identifica la dirección en donde se realiza el servicio, con Google Maps se obtiene la distancia entre el nodo origen que siempre es A: 9921 Paseo Montril, San Diego, CA, 92129, Estados Unidos y cada uno de los destinos a visitar para realizar el servicio demandado en cada uno de los días, posteriormente se obtiene la matriz de distancia correspondiente, de ahí que se requiere determinar el orden de servicios a realizar que minimice la distancia total recorrida.

La Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 muestran la calendarización de los servicios y también la matriz simétrica de distancias recorridas del nodo origen al nodo destino.

TABLA 1
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 1 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 1	Hora
B	09:00 a.m.
C	11:00 a.m.
D	01:00 p.m.
E	03:00 p.m.

DÍA 1 Matriz de distancias					
	A	B	C	D	E
A					
B	15.2				
C	4.6	12.6			
D	2.9	13.6	4.1		
E	18.2	22.9	23.5	20.6	

TABLA 2
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 2 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 2	Hora
B	08:30 a.m.
C	10:00 a.m.
D	11:30 a.m.
E	01:00 p.m.
F	03:30 p.m.

DÍA 2 Matriz de distancias						
	A	B	C	D	E	F
A						
B	3.6					
C	9.8	7.4				
D	18.6	20.6	27			
E	18.2	20.2	20.2	2		
F	16.9	14.6	9.5	12.9	14.1	

TABLA 3
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 3 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 3	Hora
B	07:00 a.m.
C	09:00 a.m.
D	11:00 a.m.
E	12:30 p.m.
F	02:30 p.m.
G	04:30 p.m.

DÍA 3 Matriz de distancias							
	A	B	C	D	E	F	G
A							
B	19.3						
C	17.7	10.6					
D	11.9	11	14.8				
E	14.4	13.7	17.5	3.1			
F	9.4	11.9	14.3	2.8	5.3		
G	5.5	23.5	22.4	14.6	18.1	12.9	

TABLA 4
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 4 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 4	Hora	DÍA 4 Matriz de distancias				
B	9:00 a.m.	A	B	C	D	E
C	11:00 a.m.	A				
D	12:30 a.m.	B	7.0			
E	03:00 p.m.	C	20.1	26.0		
		D	1.9	7.8	19.3	
		E	18.9	22.7	21.1	19.3

TABLA 5
SERVICIOS AGENDADOS DÍA 5 Y MATRIZ DE DISTANCIAS

Día 5	Hora	DÍA 5 Matriz de distancias					
B	08:00 a.m.	A	B	C	D	E	F
C	10:00 a.m.	A					
D	11:30 a.m.	B	8.9				
E	01:00 p.m.	C	7.1	13.5			
F	03:30 p.m.	D	15.8	24	13		
		E	18.4	26.7	15.6	3	
		F	18.2	26.4	15.4	2.6	0.7

B. Modelado Matemático

En este trabajo se hace uso de la formulación clásica del TSP presentado en Langevin, Soumis y Desrosiers (1990).

Los supuestos que se consideran en este modelo son los siguientes:

Supuesto 1: Se tiene información correspondiente a la calendarización de servicios de limpieza de cinco días.

Supuesto 2: Solo se cuenta con un vehículo para realizar los servicios.

Supuesto 3: Siempre se parte y se regresa al mismo origen (Punto A).

Supuesto 4: No hay paros por reabastecimiento de combustible.

El modelo matemático se formula en primer lugar como un problema de asignación a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4), donde la función objetivo garantiza la minimización de la distancia total recorrida.

Las ecuaciones (2) y (3) aseguran que el nodo es visitado una sola vez.

La ecuación (5) garantiza que todas las variables x_{ij} sean estrictamente enteras.

Y la ecuación (6) se establece como una restricción de ruptura de subrecorridos.

Parámetros:

d_{ij} = Distancia recorrida entre el nodo i y el nodo j

Variables de decisión:

$x_{ij} = 1$, si la ruta va a lo largo del arco (i, j)

0, en otro caso

9 **Función objetivo:** Minimizar la distancia total recorrida (1).

$$\text{Min} \sum_i \sum_j d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

La ecuación (2) utilizada para asegurar única llegada a cada nodo.

$$\sum_i x_{ij} = 1, \forall j = 1, \dots, n \quad (2)$$

La ecuación (3) utilizada para asegurar que cada vehículo sale de cada nodo solo una vez.

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

La ecuación (4) designa que las variables tienen que ser mayores o iguales que 0 pero menores o iguales 1.

La ecuación (5) restringe a que la variable x_{ij} sea estrictamente entera.

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall ij \quad (4)$$

$$x_{ij} \text{ enteras } \forall ij \quad (5)$$

La ecuación (6) se establece para asegurar que se forma un circuito. Esta ecuación garantiza que para cada subconjunto Q del conjunto V se elimine un subrecorrido.

$$\sum_{i \in Q, j \in Q} x_{ij} \geq 2 \quad Q \subset V / \{1\}, 2 \leq |Q| \leq n - 2 \quad (6)$$

Para la solución del modelo y la instancia descrita en esta sección, se realizó la implementación y solución utilizando el software GAMS 25.1 y se empleó una computadora con procesador AMD Ryzen 5 y 12 Gb en RAM, los tiempos de solución observados en general son menores a 2 segundos dada la programación y la complejidad del modelo.

III. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En relación con el proceso logístico de la empresa y con base en la información compartida por la empresa, la Tabla 6 tiene el objetivo de mostrar información antes de la mejora acerca de la ruta, la distancia total recorrida, la cantidad de posibles subrecorridos y la figura que ilustra la ruta actual según el día de servicio (Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, y Fig. 5).

Como se aprecia en los días 1, 2, 3, 4 y 5, se recorren 70.7 millas, 71 millas, 71.5, 90.5 millas y 57.3 millas, respectivamente, de igual modo los posibles subrecorridos en 5, 6 y 7 nodos son 32, 64 y 128, respectivamente.

TABLA 6

INFORMACIÓN ANTES DE LA MEJORA DE LA RUTA, DISTANCIA TOTAL RECORRIDA, CANTIDAD DE SUBRECORRIDOS Y FIGURA.

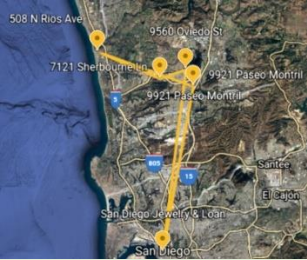
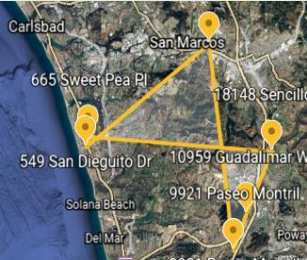

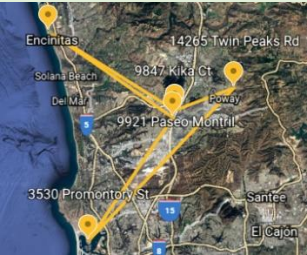
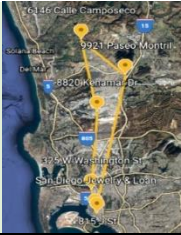
Ruta antes de la mejora	Distancia total recorrida (millas)	Cantidad de subrecorridos	Figura ilustrativa
A-B-C-D-E-A	70.7	32	
A-B-C-D-E-F-A	71	64	
A-B-C-D-E-F-G-A	71.5	128	
A-B-C-D-E-A	90.5	32	
A-B-C-D-E-F-A	57.3	64	

Fig. 1. Ruta actual de servicios agendados día 1

Fig. 2. Ruta actual de servicios agendados día 2

Fig. 3. Ruta actual de servicios agendados día 3

Fig. 4. Ruta actual de servicios agendados día 4

Fig. 5. Ruta actual de servicios agendados día 5

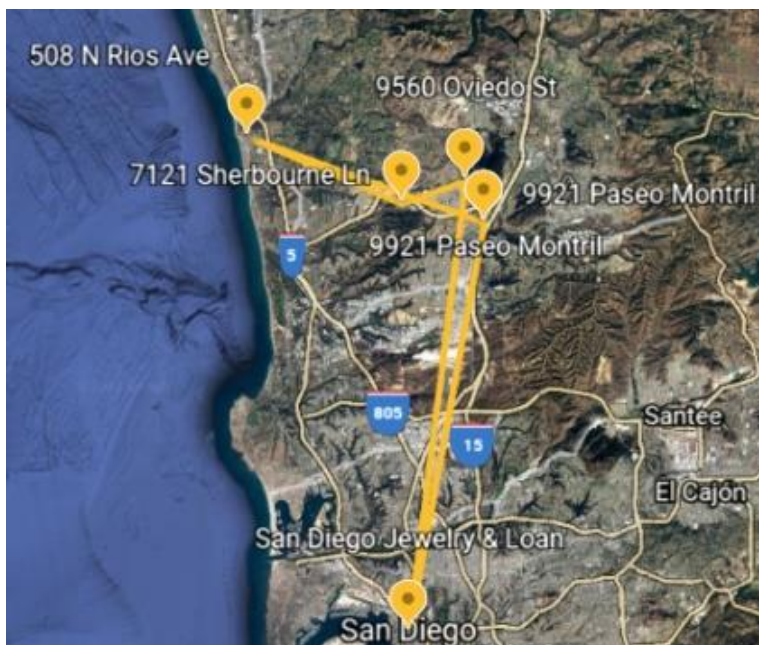


Fig. 1. Ruta actual de servicios agendados día 1.

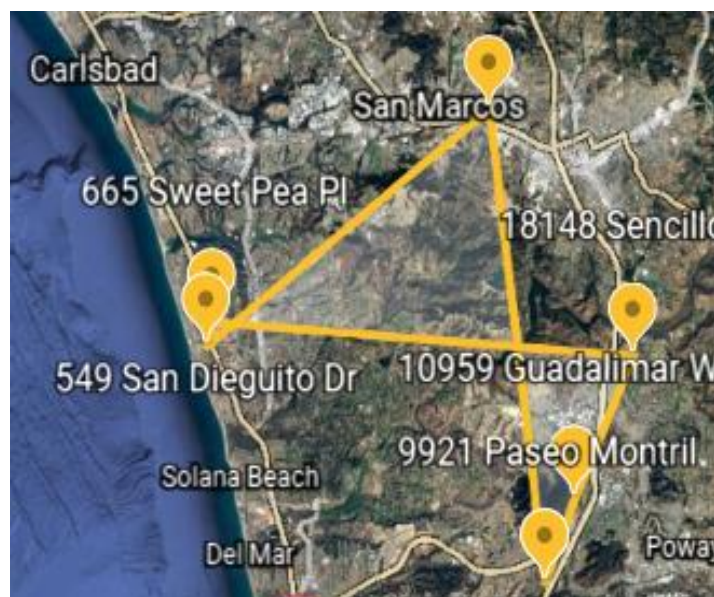


Fig. 2. Ruta actual de servicios agendados día 2.

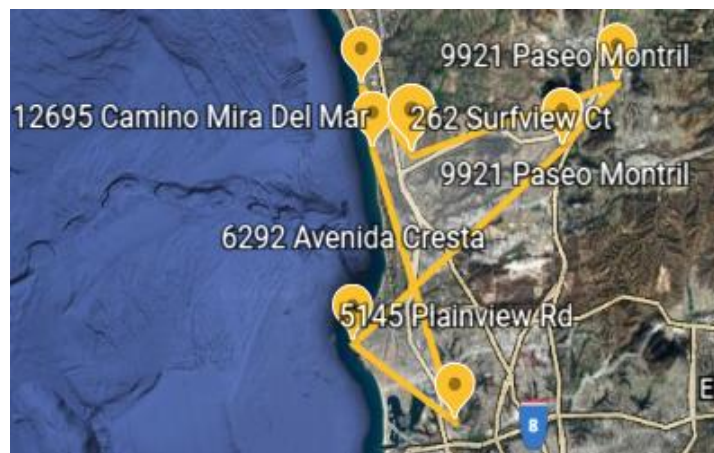


Fig. 3. Ruta actual de servicios agendados día 3.

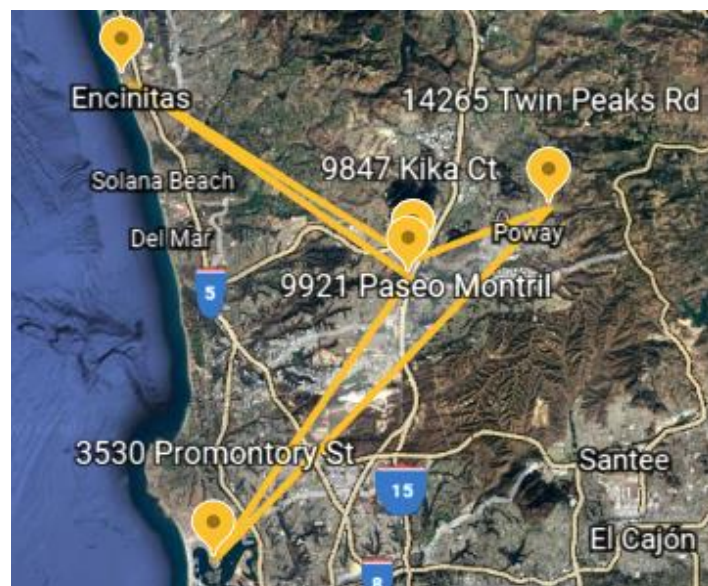


Fig. 4. Ruta actual de servicios agendados día 4.

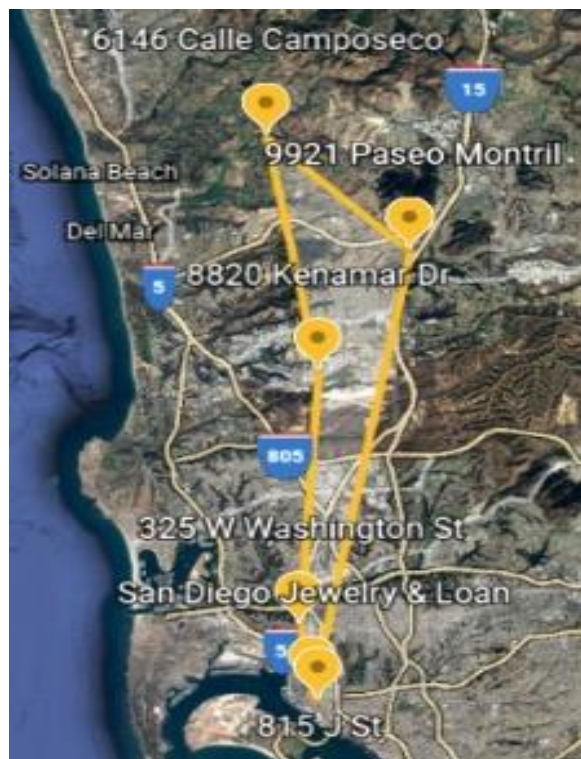

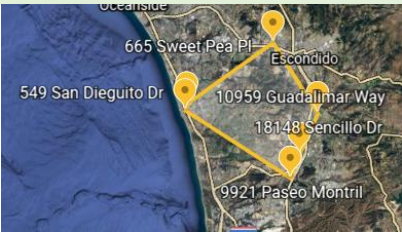
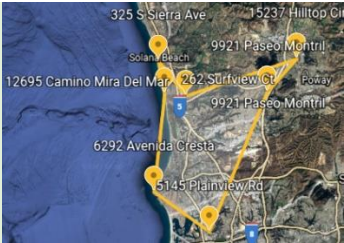
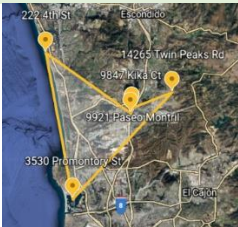



Fig. 6. Ruta actual de servicios agendados día 5.

Una vez que se ha solucionado el modelo TSP de programación lineal de donde se obtiene la planificación óptima de rutas de servicios de limpieza para esta empresa, se determina que para el día 1 la ruta óptima sea A – D – C – B – E – A con un total de 60.7 millas recorridas, para el día 2 la ruta óptima sea A – B – C – F – D – E – A con un total de 53.6 millas recorridas, para el día 3 la ruta óptima sea A – C – B – D – E – F – G – A con un total de 66.1 millas recorridas, para el día 4 la ruta óptima sea A – B – C – E – D – A con un total de 65.3 millas recorridas y finalmente el día 5 la ruta óptima sea A – B – C – E – F – D – A (con un total de 57.10 millas recorridas. Como se puede observar, una vez obtenida la solución de las instancias modeladas se eliminan subrecorridos y se obtiene un circuito (véase Tabla 7, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10).

TABLA 7		
INFORMACIÓN CON LA MEJORA DE LA RUTA, DISTANCIA TOTAL RECORRIDA, CANTIDAD DE SUBRECORRIDOS Y FIGURA.		
Ruta óptima	Distancia total recorrida (millas)	Figura ilustrativa
A-D-C-B-E-A	60.7	 Fig. 7. Ruta sugerida día 1
A-B-C-F-D-E-A	53.6	 Fig. 7. Ruta sugerida día 2
A-C-B-D-E-F-G-A	66.1	 Fig. 8. Ruta sugerida día 3
A-B-C-E-D-A	65.3	 Fig. 9. Ruta sugerida día 4
A-B-C-E-F-D-A	57.1	 Fig. 80. Ruta sugerida día 5

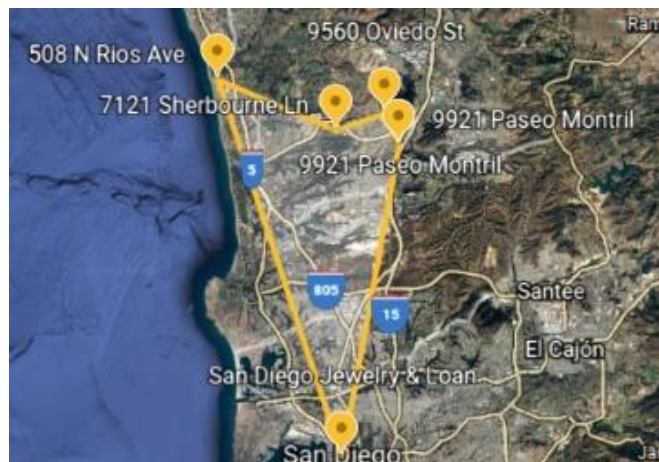


Fig. 6. Ruta sugerida día 1.

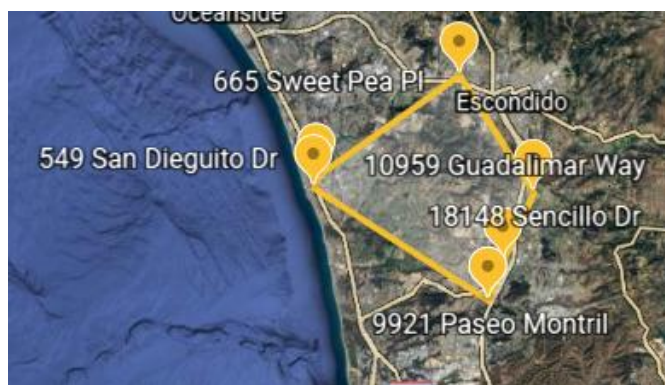


Fig. 7. Ruta sugerida día 2.

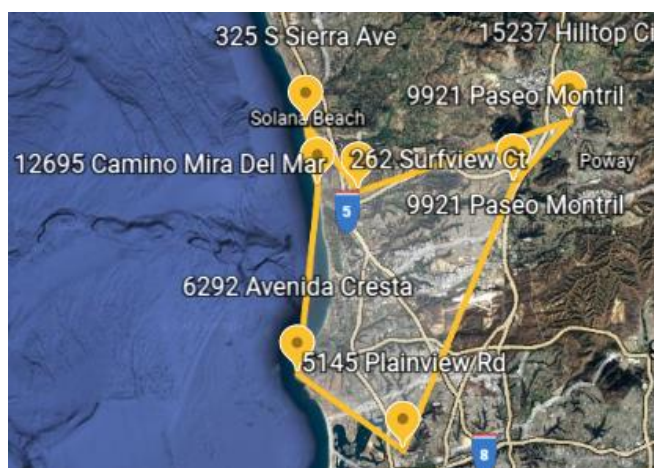


Fig. 9. Ruta sugerida día 3.

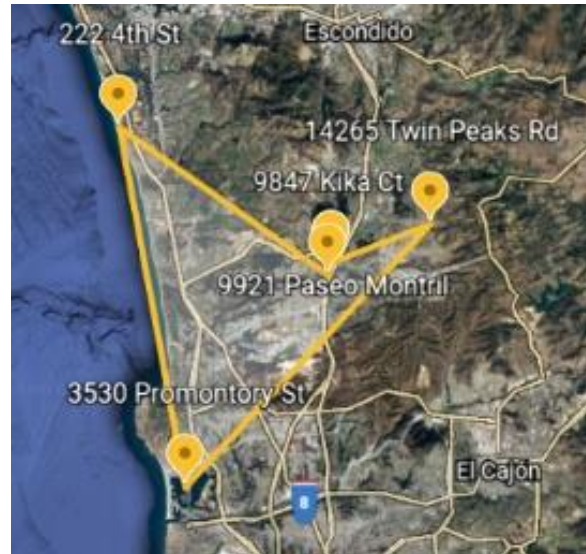


Fig. 10. Ruta sugerida día 4.



Fig. 11. Ruta sugerida día 5.

En efecto la distancia total recorrida entre la práctica actual y la que sugiere la solución óptima, esta última es menor en 58 millas. Se debe agregar que la relación existente entre millas y consumo de combustible del vehículo representa un ahorro de 2.3 galones de gasolina equivalente a \$9.5 dólares de ahorro para dicho recorrido.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo la formulación clásica del TSP mostrada en la sección II.B Modelado Matemático permitió la minimización de la distancia total recorrida y la asignación de los servicios de limpieza.

Aunque la naturaleza combinatoria del TSP es compleja el modelo clásico y la programación realizada en GAMS permite obtener el óptimo global considerando hasta 49 nodos destino.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar un potencial de mejora en cuanto a los tiempos de ejecución de las actividades de la empresa de 32%, resultado que evidencia el beneficio en cuanto a mejor aprovechamiento de la capacidad actual de la empresa para atender los servicios demandados, y eventualmente dicha capacidad adicional (obtenida por la optimización) se podría asignar para atender los servicios no programados sin necesidad de incurrir en mayor contratación o bien aumentar la cobertura de demanda programada con los mismos recursos operativos (personal y vehículos).

En lo que respecta a eficiencia operativa, la reducción del 16% en las distancias recorridas, impacta proporcionalmente los costos logísticos de la empresa (consumo de combustibles y desgaste de los vehículos), tomando en cuenta un costo medio de los combustibles de \$4.14 dólares, los ahorros potenciales semanales de la empresa podrían alcanzar los \$494 dólares anuales, sin considerar los gastos directos por mantenimiento que también se reducirían.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México y a la División de Ingeniería Industrial del Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán (TESJo) por el apoyo para realizar el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] U. Klanšek, "Using The Traveling Salesman Problem Solution for Optimal Route Scheduling in Construction Management," *Organ. Technol. Manag. Constr. An Int. J.*, vol. 3, no. 1, p. 7, 2011.
- [2] R. A. Hincapié et al., "Técnicas heurísticas aplicadas al problema del cartero viajante (TSP)," *Scientia Et Technica*, vol. 10, núm. 24, mayo, 2004, pp. 1-6.
- [3] E. S. Hornig, N. R. Fuentealba, "Modelo aco para la recolección de residuos por contenedores," *Ingeniare*, vol. 17, no. 2, pp. 236–243, 2009.
- [4] M. Monteón, "Aplicación del Modelo del Agente Viajero en la distribución de especias," *Lat. Am. J. Appl. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 5–8, 2018.
- [5] P. M. Hariyadi, P. T. Nguyen, I. Iswanto, D. Sudrajat, "Traveling Salesman Problem Solution using Genetic Algorithm," *J. Crit. Rev.*, vol. 7, no. 1, pp. 56–61, 2020.
- [6] L. Sengupta, R. Mariescu-Istodor, P. Frănti, "Planning your route: where to start?," *Comput. Brain Behav.*, vol. 1, no. 3, pp. 252–265, 2018.
- [7] M. Dry, M. D. Lee, D. Vickers, P. Hughes, "Human performance on visually presented traveling salesperson problems with varying numbers of nodes," *J. Probl. Solving*, vol. 1, no. 1, p. 4, 2006.
- [8] D. Lagos, R. Mancilla, P. Leal, F. Fox, "Performance measurement of a solution for the travelling salesman problem for routing through the incorporation of service time variability," *Ing. e Investig.*, vol. 39, no. 3, pp. 44–49, 2019.
- [9] Y. Shi, Y. Zhang, "The neural network methods for solving Traveling Salesman Problem," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 199, pp. 681–686, 2022.
- [10] J. I. Pérez Rave, G. P. Jaramillo Álvarez, "Espacio literario relevante sobre el problema del vendedor viajero (TSP): contenido, clasificación, métodos y campos de inspiración," *Production*, vol. 23, no. 4, pp. 866–876, 2013.

Diseño e implementación de un Autoencoder para la supresión de ruido de diferente naturaleza en imágenes de color

Design and implementation of an Autoencoder for the suppression of noise of different nature in color images

Armando Adrián **Miranda-González**¹, Alberto Jorge **Rosales-Silva**², Dante **Mújica-Vargas**³
Ponciano Jorge **Escamilla-Ambrosio**⁴, Jean Marie **Vianney-Kinani**⁵, Floriberto **Ortiz-Rodríguez**⁶

¹Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-4673-0490> | amirandag1100@alumno.ipn.mx

²Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-8436-3025> | arosales@ipn.mx

³Tecnológico Nacional de México, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-8665-4096> | dante.mv@cenidet.tecnm.mx

⁴Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0003-3772-3651> | pescamillaa@ipn.mx

⁵Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0001-5237-3050> | jkinani@ipn.mx

⁶Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO
<https://orcid.org/0000-0002-2608-8077> | flortiz@ipn.mx

Recibido 02-12-2022, aceptado 15-02-2023.

Resumen

El presente artículo se centra en la propuesta de una red neuronal de tipo Autoencoder para la supresión de diversos tipos de ruido presente en imágenes de color. Existen diversos tipos de algoritmos para la supresión de ruido en imágenes como lo son las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) los cuales requieren tanto de una gran cantidad de datos para su entrenamiento como de mayor carga computacional, aunque el mayor problema que estos presentan es que comúnmente se centran en un solo tipo de ruido causando que en algunas ocasiones la imagen no sea procesada de manera adecuada y al finalizar su tratamiento contenga píxeles corruptos los cuales causen que haya pérdida de detalles importantes dentro de la imagen. Por este motivo, esta propuesta proporciona evidencia de que el uso de autoencoders para la supresión de diversos tipos de ruidos en imágenes es factible, a través de este artículo se mostrarán resultados subjetivos y objetivos que determinarán la factibilidad del uso de este tipo de redes neuronales.

Palabras clave: autoencoder, convoluciones, redes neuronales, supresión de ruido.

Abstract

This article focuses on the proposal of a neural network called Autoencoder for the suppression of various kinds of noise present in color images. There are several kinds of algorithms for denoising images, such as Convolutional Neural Networks (CNN), which require a large amount of data for their training and a greater computational complexity, although the biggest problem they present is that they commonly focus on a single kind of noise, sometimes causing that the image to not be processed properly and at the end of its treatment it contains corrupted pixels which cause the loss of important details within the image. For this reason, this proposal provides evidence that the use of Autoencoders for the denoising of several kinds of noises is feasible, through this article subjective and objective results will be shown that will determine the feasibility of using this kind of network neural.

Index terms: autoencoder, convolutions, neural networks, denoising.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la comunidad científica se ha centrado en el desarrollo de algoritmos capaces de suprimir el ruido presentado en imágenes, los cuales en su mayoría están centrados en resolver la problemática de un solo tipo de ruido [1], [2], [3]. Las fuentes de ruido difieren en cuanto a su tipo y pueden ser generadas principalmente durante la adquisición o transmisión de la imagen, debido a la problemática de la existencia de diversos tipos de ruido y que a su vez la naturaleza de su origen difiere es común que no siempre se utilice un filtro adecuado para la supresión del ruido y que la imagen al finalizar su preprocesamiento aún contenga píxeles corruptos o haya perdido detalles importantes.

Los filtros especializados para la supresión de ruido presente en imágenes se clasifican dependiendo del dominio en que estos trabajen como lo son el dominio espacial y el dominio de la frecuencia [1]. En el dominio espacial se encuentra una nueva división entre filtros lineales y no lineales, estos tipos de filtros en su mayoría solo son útiles para un solo tipo de ruido, por ejemplo, podemos encontrar el filtro de media para ruido gaussiano y el filtro de mediana para ruido impulsivo [4].

El uso de Inteligencia Artificial (*Artificial Intelligence*, AI) dentro del filtrado de imágenes tuvo sus orígenes durante la década de los 50, pero no fue hasta el año 1986 por medio de Rumelhart, Hinton y Williams asentaron las bases de lo que hoy en día conocemos [5].

La AI tiene, principalmente, dos tipos de clasificaciones: el Machine Learning (*Aprendizaje Máquina*, ML) y Deep Learning (*Aprendizaje Profundo*, DL), dentro de esta última clasificación podemos encontrar herramientas que han logrado éxito en aplicaciones como la detección de bordes, extracción de características, clasificación de imágenes, reconocimiento de patrones, entre otras.

Las redes neuronales artificiales son la parte fundamental del DL, este tipo de redes buscan emular el funcionamiento de una red neuronal biológica, estas aprenden recibiendo una gran cantidad de datos y mediante cada fase del entrenamiento aprenden patrones los cuales al finalizar el proceso de aprendizaje se vuelven capaces de reproducir la tarea determinada para la cual fue entrenada la red. Al igual que en los filtros clásicos existen diversos tipos de redes neuronales capaces de suavizar el ruido presente en las imágenes, pero estos tipos de ruido requieren de gran cantidad de datos durante la etapa de aprendizaje [6].

El objetivo de este artículo es diseñar y validar el rendimiento de una red neuronal artificial de tipo Autoencoder, este tipo de red neuronal se denomina como no supervisada ya que los datos utilizados durante la fase de entrenamiento y evaluación no requieren de etiquetas [7].

II. METODOLOGÍA

El Autoencoder trabaja con información que se ingresa a la entrada de la red y reduce dimensionalmente dicha información, conocido como el proceso de codificación, hasta un punto en que esa información esta presentada en pequeñas dimensiones y se ubica en un punto que se conoce como espacio latente (Z), una vez la información es almacenada en Z se procede a la reconstrucción de la información, proceso de decodificación, hasta llegar a sus dimensiones originales como se muestra en la Fig. 1 [8]. Al finalizar este proceso se busca que la información obtenida en la capa de salida sea igual a la información introducida en la capa de entrada, como en la ecuación (1).

$$F(x) = G(\tilde{x}) \quad (1)$$

donde, $F(x)$ = función de codificación con respecto a la información de entrada x y $G(\tilde{x})$ = función de decodificación con respecto a la información proveída por el espacio latente (Z).

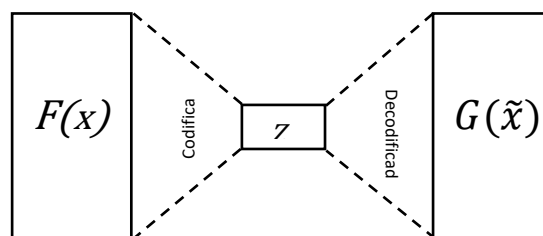


Fig. 1. Arquitectura Autoencoder [6].

La propuesta de este trabajo es la utilización de una variante del autoencoder denominado Denoising Autoencoder (DA) [9], en esta variante el entrenamiento se realiza por medio de imágenes que contengan algún tipo de ruido y que al final del entrenamiento se realice una comparación de la imagen generada por la red con respecto a la imagen original sin ruido. Durante el proceso tanto de codificación como de decodificación el algoritmo aprende patrones los cuales son capaces, para esta tarea en específico, de detectar píxeles corruptos dentro de una imagen y sustituirlos por los valores que crea adecuados que dicha imagen presentaba originalmente antes de ser corrompida por ruido.

En el proceso de aprendizaje del DA, se le suministra toda la información de imágenes corruptas para que, a través de convoluciones contenidas tanto en las capas de codificación como de decodificación, vaya generando nuevos valores calculados por medio de la ecuación (2).

$$net_i = \sum_i W_i x_i + b, \quad (2)$$

donde, net_i = suma ponderada de las entradas con respecto a los pesos, W_i = peso de la conexión de la neurona i , x_i = valor de entrada de la neurona i , b = sesgo.

Estos nuevos valores generados son sometidos a una función de activación denominada Unidad Lineal Rectificada (ReLU) [10] la cual se describe en la ecuación (3).

$$f(net_j) = \begin{cases} net_j & \text{si } net_j > 0 \\ 0 & \text{si } net_j \leq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

donde, $f(net_j)$ = salida de la j -ésima neurona.

Obtenidos los valores de salida, estos son comparados con las imágenes originales sin ruido a través del cálculo de la función de pérdida la cual es el Error Cuadrático Medio (MSE) como se muestra en la ecuación (4).

$$MSE = \frac{1}{3Q} \sum_{i=1}^Q \sum_{k \in \{R,G,B\}} (x_i^k - \hat{x}_i^k)^2, \quad (4)$$

donde, MSE = error cuadrático medio, Q = número total de píxeles contenidos en la imagen, x_i^k y \hat{x}_i^k denotan los valores en los canales RGB de los píxeles originales y restaurados respectivamente.

Con los resultados del MSE se procede a realizar la propagación hacia atrás (*Back Propagation*, BP) con la cual por medio del error obtenido se actualizarán todos los pesos de los filtros de convolución contenidos en el autoencoder [11]. En la Fig. 2 se muestra el algoritmo de funcionamiento del DA.

Para la fase de entrenamiento del DA se hizo uso de una base de datos denominada Best Artworks of All Time [12]. La base de datos se corrompió con cuatro diferentes tipos de ruido los cuales fueron: *ruido gaussiano*, *ruido moteado*, *ruido poisson* y *ruido sal y pimienta*, los modelos matemáticos de los tipos de ruido se describen en [13]. Para el ruido gaussiano, moteado y sal y pimienta las imágenes se corrompieron con diferentes densidades de distribución que iban desde 0.1 hasta 0.5, esto con la finalidad de que la red sea capaz de suprimir imágenes que se encuentren corrompidas con una alta densidad de ruido. Toda la información de la nueva base de datos generada se dividió en un 80% para la fase de entrenamiento y un 20% para la fase de pruebas; al no requerir de etiquetas para el cálculo del error [14] las imágenes reconstruidas por el DA se comparan con las imágenes originales.

Algoritmo: Autoencoder

```

Datos: (x = imagen corrupta)
Alimentar la capa de entrada (capa 1) del autoencoder con x
mientras capaActual no sea capa decodificación
    Calcular neti y salidas de todas las neuronas de la capa actual
    Codificar los datos
    capaActual=capaActual +1
fin mientras
Z=Espacio latente
mientras queden capas por hacer
    Calcular neti y salidas de todas las neuronas de la capa actual
    Decodificar los datos
    capaActual=capaActual +1
fin mientras
Calcular función de pérdida
Actualizar pesos
devolver resultado en la capa de salida
fin
    
```

Fig. 2. Algoritmo del funcionamiento del autoencoder.

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

A. Pruebas

Una vez entrenado el DA se genera un modelo, el cual se aplica directamente sobre los datos de prueba previamente definidos. Para cuantificar los resultados, se hizo uso de dos métricas como lo son la Relación Pico Señal a Ruido (*PSNR*) la cual proporciona la relación entre la máxima energía posible de una señal y el ruido que la afecta, una imagen al ser una señal digital puede ser analizada mediante esta métrica, por otra parte, se usa también el Índice de Similitud Estructural (*SSIM*) el cual es una métrica que cuantifica la degradación de la calidad de la imagen provocada por el procesamiento. Estas dos métricas se describen en las ecuaciones (5) y (6), respectivamente [15].

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right), \quad (5)$$

donde, *PSNR* = Relación Pico Señal a Ruido.

$$SSIM_{(x,y)} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (6)$$

$$\sigma_x = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}, \quad (7)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N}, \quad (8)$$

donde, *SSIM* = índice de similitud estructural, μ_x y μ_y = denotan el promedio de la imagen original y restaurada respectivamente, σ_x y σ_y = denotan la varianza de la imagen original y restaurada, σ_{xy} = covarianza entre la imagen original y la restaurada, C_1 y C_2 = constantes estabilizadoras.

B. Resultados

Para la fase de resultados se realizó una comparativa con tres diversas redes neuronales especializadas para la supresión de ruido como lo son: Denoising Convolutional Neural Network (*DnCNN*) [16], Nonlinear Activation Free Network for Image Restoration (*NAFNET*) [17] y Efficient Transformer for High-Resolution Image Restoration (*Restormer*) [18], Resnet [19] e Inception [20]. La comparativa consiste en una inspección visual de los resultados y el uso de las métricas previamente mencionadas.



Fig. 3. Imágenes de prueba.

Para el primer caso se realizó el análisis con cinco diferentes imágenes corrompidas con ruido gaussiano, los resultados de *PSNR* y *SSIM* se muestran a continuación (véase Tabla 1).

TABLA 1
VALORES PSNR Y SSIM PARA CINCO IMÁGENES CORROMPIDAS POR DIFERENTES NIVELES DE RUIDO GAUSSIANO.

Imagen	σ	PSNR						SSIM					
		Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer	Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer
Camille Pissarro	0	25.060	43.722	19.065	28.682	17.757	31.371	0.879	0.998	0.511	0.898	0.529	0.934
	0.10	23.112	19.433	18.690	18.382	18.642	18.116	0.794	0.804	0.466	0.771	0.496	0.764
	0.15	25.194	16.410	18.403	15.728	18.458	15.534	0.785	0.763	0.457	0.748	0.488	0.737
	0.20	24.785	14.199	17.795	13.642	18.030	13.575	0.751	0.717	0.435	0.707	0.468	0.696
	0.25	19.900	12.480	17.307	12.006	16.813	11.992	0.699	0.675	0.404	0.646	0.445	0.643
	0.30	18.905	11.088	16.534	10.749	15.698	10.710	0.668	0.623	0.374	0.603	0.416	0.589
	0.35	18.814	9.928	16.012	9.660	15.040	9.618	0.644	0.568	0.343	0.550	0.398	0.537
	0.40	21.155	8.935	15.321	8.700	14.607	8.676	0.734	0.518	0.314	0.502	0.375	0.489
	0.45	19.976	8.083	14.169	7.880	13.968	7.868	0.727	0.472	0.286	0.454	0.355	0.444
	0.50	17.823	7.349	12.480	7.166	12.766	7.169	0.704	0.431	0.261	0.412	0.351	0.404
Edgar Degas 1	0	32.364	59.757	18.823	34.779	16.356	36.521	0.986	1.000	0.759	0.985	0.738	0.990
	0.10	25.562	19.751	19.443	18.703	18.793	18.489	0.934	0.922	0.735	0.894	0.731	0.907
	0.15	28.963	16.544	18.882	15.928	19.351	15.735	0.934	0.894	0.726	0.872	0.731	0.882
	0.20	24.301	14.210	18.281	13.785	18.575	13.650	0.910	0.857	0.711	0.840	0.723	0.848
	0.25	19.071	12.444	16.353	12.151	17.822	12.037	0.860	0.815	0.683	0.802	0.705	0.809
	0.30	25.011	11.050	16.270	10.837	16.229	10.749	0.901	0.764	0.666	0.757	0.687	0.760
	0.35	22.635	9.923	15.411	9.858	15.543	9.700	0.889	0.705	0.627	0.697	0.654	0.700
	0.40	18.939	9.006	14.212	8.853	14.319	8.833	0.867	0.637	0.574	0.628	0.628	0.630
	0.45	18.102	8.249	13.193	8.128	14.195	8.119	0.854	0.560	0.509	0.552	0.583	0.553
	0.50	15.474	7.625	11.931	7.524	13.224	7.524	0.815	0.481	0.431	0.474	0.543	0.475
Edgar Degas 2	0	32.599	55.537	19.047	31.673	17.326	35.278	0.980	1.000	0.731	0.965	0.709	0.980
	0.10	25.664	19.682	18.881	18.556	18.451	18.279	0.903	0.880	0.682	0.839	0.681	0.854
	0.15	27.867	16.451	17.641	15.772	18.471	15.540	0.913	0.841	0.661	0.807	0.671	0.821
	0.20	26.407	14.122	16.061	13.662	17.906	13.478	0.902	0.799	0.633	0.771	0.657	0.785
	0.25	19.796	12.315	15.671	11.970	16.520	11.823	0.858	0.749	0.620	0.733	0.635	0.743
	0.30	18.440	10.875	15.424	10.611	15.967	10.505	0.814	0.703	0.604	0.686	0.610	0.697
	0.35	16.309	9.690	15.321	9.473	14.018	9.400	0.780	0.656	0.587	0.638	0.579	0.648
	0.40	13.857	8.678	13.760	8.495	13.016	8.449	0.699	0.608	0.548	0.586	0.551	0.599
	0.45	16.768	7.816	13.409	7.660	13.215	7.621	0.764	0.558	0.524	0.535	0.549	0.548
	0.50	14.840	7.054	12.293	6.916	12.139	6.897	0.732	0.507	0.483	0.486	0.521	0.498
Gustave Courbet	0	24.179	53.679	21.289	33.570	21.755	36.395	0.907	0.996	0.705	0.930	0.695	0.959
	0.10	29.090	19.484	17.690	18.208	19.719	17.902	0.803	0.644	0.473	0.589	0.487	0.601
	0.15	25.717	16.295	16.180	15.499	17.706	15.189	0.744	0.579	0.438	0.535	0.448	0.549
	0.20	21.429	13.922	15.512	13.385	15.808	13.131	0.686	0.524	0.421	0.492	0.420	0.505
	0.25	18.223	12.040	14.921	11.657	13.780	11.472	0.619	0.478	0.405	0.454	0.388	0.467
	0.30	17.756	10.517	14.752	10.227	13.109	10.065	0.600	0.437	0.393	0.416	0.376	0.429
	0.35	16.064	9.240	13.153	9.006	11.368	8.874	0.549	0.394	0.353	0.381	0.342	0.391
	0.40	14.504	8.144	12.000	7.955	11.118	7.843	0.497	0.357	0.314	0.341	0.326	0.351
	0.45	13.620	7.179	10.652	7.022	11.204	6.933	0.459	0.320	0.272	0.301	0.312	0.312
	0.50	13.468	6.326	9.625	6.193	9.114	6.130	0.440	0.287	0.236	0.269	0.266	0.280
Henri Rousseau	0	29.633	57.999	18.127	30.060	17.056	34.139	0.943	1.000	0.548	0.935	0.527	0.971
	0.10	24.489	19.493	17.979	18.324	17.994	18.195	0.871	0.858	0.511	0.812	0.488	0.817
	0.15	24.175	16.370	17.738	15.644	17.925	15.488	0.866	0.825	0.502	0.784	0.479	0.791
	0.20	24.730	14.056	16.594	13.557	17.409	13.427	0.865	0.786	0.481	0.749	0.467	0.758
	0.25	19.729	12.265	15.520	11.906	15.963	11.794	0.836	0.746	0.464	0.713	0.451	0.723
	0.30	19.201	10.819	14.920	10.541	14.947	10.453	0.822	0.698	0.442	0.670	0.428	0.682
	0.35	17.245	9.608	13.996	9.383	14.389	9.315	0.793	0.648	0.417	0.622	0.402	0.633
	0.40	17.671	8.591	14.142	8.410	12.730	8.356	0.609	0.591	0.395	0.572	0.376	0.579
	0.45	16.747	7.714	13.494	7.530	11.661	7.523	0.579	0.530	0.356	0.508	0.338	0.519
	0.50	15.521	6.965	12.041	7.494	12.249	6.807	0.555	0.469	0.312	0.055	0.316	0.455

En negritas se muestran los datos que obtuvieron mejores resultados para cada imagen y a su vez para cada densidad de ruido presente en la imagen, el DA cuando no hay ruido presente en la imagen tiene una ligera

disminución en sus métricas, sin embargo, cuando se va presentando ruido en la imagen se va obteniendo una buena supresión del ruido. Como se percibe en densidades altas de ruido el autoencoder provee una reconstrucción aceptable en comparación con las otras tres redes analizadas.

En la Fig. 4 se muestra la inspección visual de las imágenes procesadas, la densidad del ruido utilizada para ejemplificar dicha inspección es igual a 0.5, en la comparativa se percibe que el *DA* reconstruye las tonalidades de los píxeles que se habían visto afectados por el ruido Gaussiano a diferencia de las otras redes que mantienen la tendencia propia de este ruido. En la Fig. 5 se realiza un acercamiento para percibir de mejor manera el procesamiento realizado por cada una de las redes.

La Fig. 6 corresponde a las gráficas obtenidas de los resultados de las métricas utilizadas para las diversas densidades de ruido empleadas.



Fig. 4. Imágenes filtradas resultantes por el método analizado y de comparativo aplicados a diversas imágenes con un nivel de ruido gaussiano de 50%.

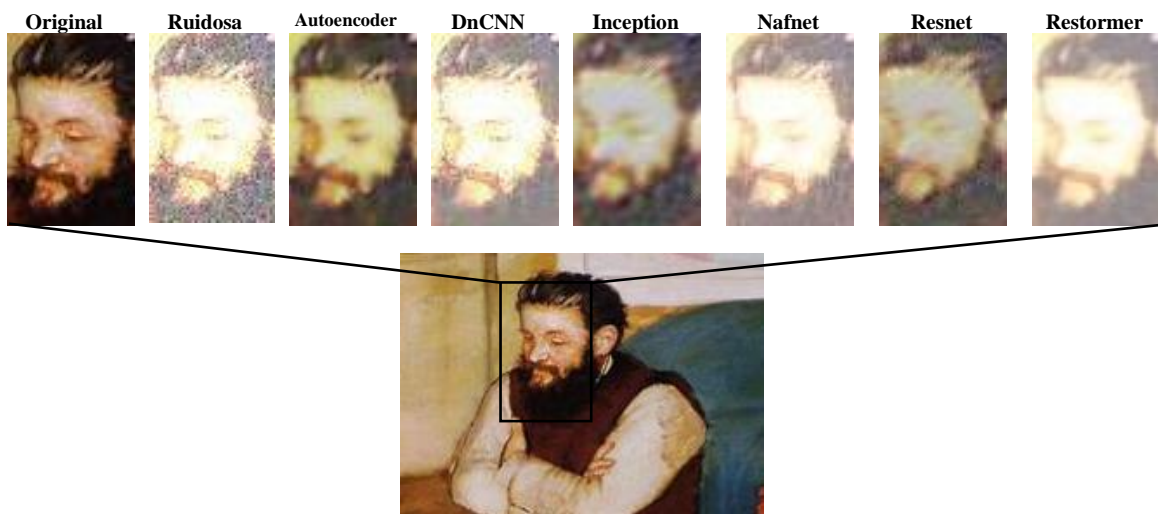


Fig. 5. Acercamiento de la imagen original contra imagen corrupta con ruido Gaussiano e imágenes procesadas mediante diversos métodos.

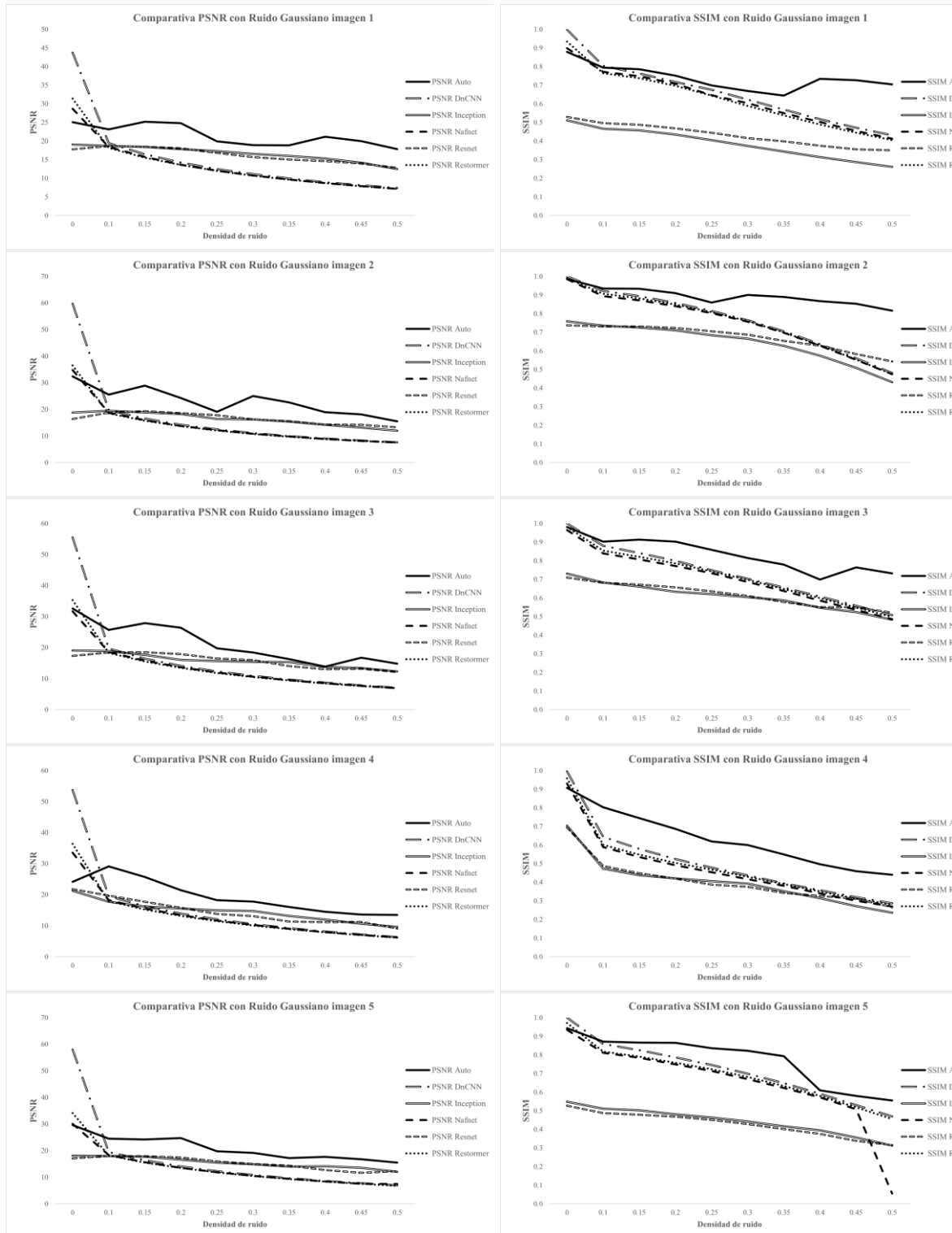


Fig. 6. Valores PSNR y SSIM para las imágenes analizadas con diversas densidades de ruido gaussiano.

Para el ruido moteado se realizó el mismo análisis mencionado anteriormente sobre las cinco imágenes propuestas para ejemplificar los resultados (véase Tabla 2). De igual manera el DA al no haber ruido presente en la imagen presenta una disminución en cuanto a su *PSNR* y *SSIM* pero una vez presente el ruido las métricas tienden a favor del algoritmo propuesto.

TABLA 2
VALORES PSNR Y SSIM PARA CINCO IMÁGENES CORROMPIDAS POR DIFERENTES NIVELES DE RUIDO MOTEADO.

Imagen	σ	PSNR						SSIM					
		Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer	Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer
Camille Pissarro	0	28.602	43.722	19.065	28.682	17.757	31.371	0.895	0.998	0.511	0.898	0.529	0.934
	0.10	25.120	25.472	17.600	23.384	16.367	23.641	0.769	0.803	0.411	0.651	0.417	0.678
	0.15	24.642	24.266	17.414	22.630	15.520	22.926	0.743	0.762	0.392	0.616	0.386	0.649
	0.20	24.270	23.186	16.279	21.978	14.339	22.259	0.716	0.722	0.374	0.580	0.346	0.610
	0.25	23.554	22.358	16.684	21.406	14.141	21.763	0.700	0.697	0.363	0.547	0.326	0.598
	0.30	22.890	21.539	16.170	20.802	13.614	21.227	0.677	0.670	0.355	0.503	0.303	0.578
	0.35	22.681	20.886	15.179	20.323	13.051	20.850	0.654	0.640	0.340	0.457	0.277	0.552
	0.40	21.232	20.325	15.530	19.802	13.460	20.467	0.640	0.627	0.336	0.426	0.267	0.551
	0.45	21.524	19.941	15.747	19.450	13.002	20.190	0.623	0.607	0.330	0.389	0.252	0.540
Edgar Degas 1	0	20.959	19.634	15.184	19.060	12.673	19.867	0.615	0.597	0.323	0.362	0.243	0.527
	0	34.095	59.757	18.823	34.779	16.356	36.521	0.989	1.000	0.759	0.985	0.738	0.990
	0.10	27.427	27.349	18.462	24.206	16.529	24.876	0.927	0.925	0.682	0.856	0.657	0.893
	0.15	26.473	25.929	17.419	23.305	16.140	23.840	0.913	0.905	0.650	0.834	0.618	0.873
	0.20	25.682	24.606	16.947	22.337	15.369	22.952	0.895	0.879	0.617	0.798	0.567	0.851
	0.25	24.963	23.631	16.634	21.389	14.589	22.268	0.875	0.853	0.589	0.749	0.525	0.830
	0.30	24.231	22.709	16.653	20.518	14.185	21.744	0.857	0.831	0.574	0.696	0.490	0.812
	0.35	23.496	21.871	15.704	20.054	13.516	21.311	0.833	0.805	0.549	0.660	0.454	0.794
	0.40	22.904	21.326	16.142	19.388	13.249	20.903	0.814	0.783	0.536	0.611	0.428	0.779
Edgar Degas 2	0	21.367	20.760	15.826	19.018	13.047	20.506	0.794	0.761	0.523	0.573	0.403	0.759
	0	34.565	55.537	19.047	31.673	17.326	35.278	0.980	1.000	0.731	0.965	0.709	0.980
	0.10	27.905	28.188	18.235	24.780	16.731	26.218	0.910	0.904	0.672	0.815	0.644	0.870
	0.15	26.285	27.029	18.445	23.815	16.571	25.120	0.891	0.890	0.659	0.786	0.621	0.849
	0.20	26.717	25.844	17.941	23.188	16.105	24.390	0.878	0.872	0.643	0.769	0.595	0.837
	0.25	25.798	24.850	17.528	22.734	15.509	23.734	0.867	0.857	0.629	0.759	0.573	0.821
	0.30	25.351	23.967	17.421	22.216	14.334	23.099	0.851	0.841	0.620	0.747	0.534	0.807
	0.35	23.984	23.337	17.175	21.770	14.539	22.703	0.834	0.826	0.606	0.733	0.524	0.795
	0.40	23.011	22.693	17.617	21.269	14.016	22.284	0.821	0.813	0.600	0.712	0.500	0.783
Gustave Courbet	0	23.696	22.202	17.163	20.862	14.081	21.911	0.806	0.799	0.591	0.690	0.494	0.772
	0	34.565	55.537	19.047	31.673	17.326	35.278	0.980	1.000	0.731	0.965	0.709	0.980
	0.10	27.905	28.188	18.235	24.780	16.731	26.218	0.910	0.904	0.672	0.815	0.644	0.870
	0.15	26.285	27.029	18.445	23.815	16.571	25.120	0.891	0.890	0.659	0.786	0.621	0.849
	0.20	26.717	25.844	17.941	23.188	16.105	24.390	0.878	0.872	0.643	0.769	0.595	0.837
	0.25	25.798	24.850	17.528	22.734	15.509	23.734	0.867	0.857	0.629	0.759	0.573	0.821
	0.30	25.351	23.967	17.421	22.216	14.334	23.099	0.851	0.841	0.620	0.747	0.534	0.807
	0.35	23.984	23.337	17.175	21.770	14.539	22.703	0.834	0.826	0.606	0.733	0.524	0.795
	0.40	23.011	22.693	17.617	21.269	14.016	22.284	0.821	0.813	0.600	0.712	0.500	0.783
Henri Rousseau	0	23.130	22.744	15.863	20.513	13.756	21.673	0.798	0.789	0.570	0.667	0.479	0.766
	0	30.994	57.999	18.127	30.060	17.056	34.139	0.947	1.000	0.548	0.935	0.527	0.971
	0.10	24.887	26.692	17.665	23.336	16.127	24.199	0.859	0.891	0.506	0.753	0.450	0.788
	0.15	25.583	25.399	17.258	22.561	15.463	23.217	0.846	0.858	0.486	0.719	0.418	0.759
	0.20	25.104	24.453	17.386	22.091	15.121	22.535	0.830	0.829	0.472	0.696	0.396	0.735
	0.25	24.455	23.513	17.070	21.553	14.316	21.961	0.813	0.804	0.453	0.673	0.370	0.716
	0.30	23.656	22.794	16.685	21.024	14.290	21.482	0.788	0.780	0.439	0.642	0.351	0.700
	0.35	23.198	22.159	16.488	20.450	13.715	21.044	0.769	0.760	0.424	0.612	0.331	0.685
	0.40	21.660	21.634	16.433	20.013	13.367	20.704	0.740	0.740	0.409	0.584	0.312	0.667
	0.45	22.223	21.250	16.130	19.655	13.532	20.417	0.727	0.720	0.399	0.553	0.308	0.654
	0.50	21.882	20.913	16.490	19.418	13.394	20.094	0.713	0.708	0.392	0.550	0.301	0.646

En la Fig. 7 la densidad utilizada para ejemplificar la inspección es igual a 0.5, en la comparativa se percibe que el DA mantiene los detalles presentes en la imagen sin cambiar las tonalidades originales de los píxeles. En la Fig. 8 se observa que las redes neuronales Nafnet y Restormer suavizan demasiado la imagen provocando que se pierdan los detalles del rostro, la red DnCNN si preserva los detalles al igual que el DA pero contiene mayor cantidad de píxeles aún corruptos.

La Fig. 9 corresponde a las gráficas obtenidas de los resultados para cada una de las densidades de ruido utilizadas sobre las imágenes.



Fig. 7. Imágenes filtradas resultantes por el método analizado y de comparativo aplicados a diversas imágenes con un nivel de ruido moteado de 50%.

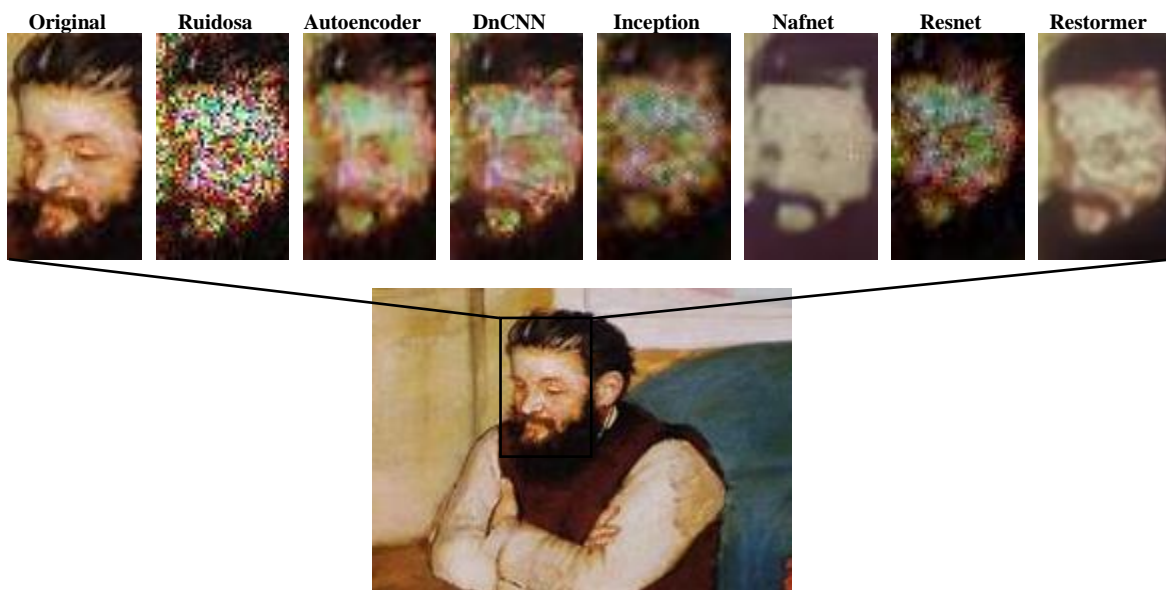


Fig. 8. Acercamiento de la imagen original contra imagen corrupta con ruido moteado e imágenes procesadas mediante diversos métodos.

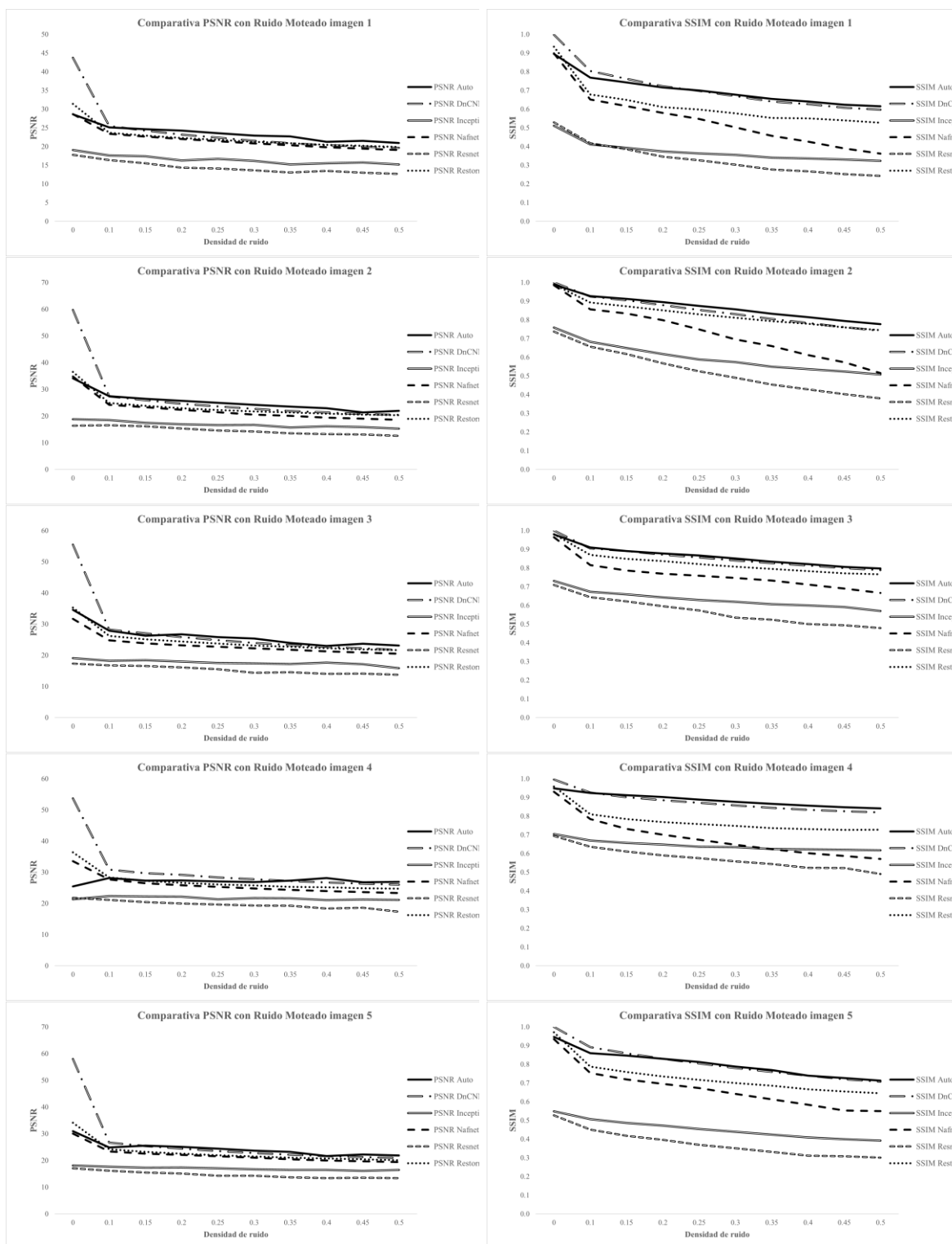


Fig. 9. Valores PSNR y SSIM para las imágenes analizadas con diversas densidades de ruido moteado.

El ruido sal y pimienta es de los ruidos más complejos que existen para ser suprimidos debido a su comportamiento aleatorio de impulsos es por ello por lo que los resultados reflejan esta misma naturaleza del ruido (véase Tabla 3), a pesar de ello el DA obtuvo mejores resultados en densidades altas.

TABLA 3
VALORES PSNR Y SSIM PARA CINCO IMÁGENES CORROMPIDAS POR DIFERENTES NIVELES DE RUIDO S&P.

Imagen	σ	PSNR						SSIM					
		Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer	Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer
Camille Pissarro	0	21.872	43.722	19.065	28.682	17.757	31.371	0.633	0.998	0.511	0.898	0.529	0.934
	0.10	21.608	23.914	17.785	21.407	16.022	21.647	0.663	0.718	0.409	0.636	0.399	0.654
	0.15	22.396	22.663	17.471	20.174	14.795	20.117	0.663	0.673	0.372	0.584	0.355	0.607
	0.20	21.733	21.464	17.064	19.300	14.064	18.768	0.640	0.628	0.338	0.542	0.318	0.561
	0.25	21.245	20.507	16.158	17.642	13.904	17.764	0.613	0.587	0.319	0.390	0.293	0.532
	0.30	20.582	19.493	15.946	7.792	13.865	16.832	0.577	0.541	0.293	0.021	0.262	0.495
	0.35	20.499	18.618	15.392	7.677	13.798	15.955	0.533	0.497	0.267	0.006	0.230	0.459
	0.40	19.934	17.867	15.032	7.857	12.395	15.292	0.504	0.470	0.257	0.017	0.219	0.440
	0.45	18.904	17.095	14.814	8.020	13.204	14.719	0.451	0.424	0.236	0.011	0.187	0.413
	0.50	18.349	16.414	14.245	7.961	12.091	14.096	0.413	0.394	0.223	0.018	0.173	0.384
Edgar Degas 1	0	21.154	59.757	18.823	34.779	16.356	36.521	0.865	1.000	0.759	0.985	0.738	0.990
	0.10	22.486	26.213	17.653	23.214	16.387	23.643	0.878	0.897	0.680	0.847	0.641	0.871
	0.15	20.445	24.471	17.152	21.682	15.176	21.772	0.853	0.861	0.637	0.810	0.581	0.839
	0.20	22.479	23.096	17.158	20.347	14.911	20.317	0.848	0.823	0.593	0.759	0.528	0.802
	0.25	22.680	21.875	16.874	19.032	13.738	19.195	0.825	0.786	0.550	0.688	0.471	0.767
	0.30	21.511	20.850	15.690	17.930	13.630	18.312	0.789	0.748	0.517	0.612	0.429	0.739
	0.35	20.726	19.967	16.148	17.202	13.642	17.543	0.753	0.708	0.487	0.542	0.391	0.707
	0.40	18.451	19.140	15.604	14.743	13.540	16.797	0.692	0.664	0.450	0.261	0.346	0.668
	0.45	19.337	18.342	15.343	11.381	12.861	16.184	0.649	0.606	0.419	0.011	0.294	0.628
	0.50	18.806	17.578	14.875	8.115	12.356	15.671	0.595	0.553	0.392	0.008	0.254	0.596
Edgar Degas 2	0	24.698	55.537	19.047	31.673	17.326	35.278	0.814	1.000	0.731	0.965	0.709	0.980
	0.10	25.190	25.427	18.487	21.328	16.807	23.179	0.847	0.834	0.625	0.734	0.587	0.839
	0.15	24.898	23.565	17.838	20.050	15.912	20.804	0.837	0.788	0.577	0.720	0.536	0.795
	0.20	24.646	22.026	17.555	18.856	15.654	18.980	0.819	0.748	0.536	0.666	0.496	0.755
	0.25	23.990	20.746	16.964	7.984	14.810	17.595	0.786	0.712	0.503	0.044	0.453	0.718
	0.30	22.630	19.603	16.474	7.124	15.219	16.395	0.743	0.667	0.460	-0.015	0.413	0.677
	0.35	21.857	18.587	15.820	7.857	14.603	15.492	0.697	0.623	0.428	0.008	0.378	0.635
	0.40	20.908	17.704	15.509	7.944	14.044	14.687	0.657	0.584	0.400	0.001	0.342	0.604
	0.45	19.821	16.836	14.981	7.747	13.920	13.885	0.600	0.529	0.363	-0.009	0.295	0.550
	0.50	18.578	16.142	14.686	7.752	13.630	13.309	0.542	0.482	0.334	-0.007	0.262	0.507
Gustave Courbet	0	23.461	53.679	21.289	33.570	21.755	36.395	0.634	0.996	0.705	0.930	0.695	0.959
	0.10	25.050	23.150	18.787	6.191	20.243	22.348	0.746	0.581	0.409	0.004	0.400	0.623
	0.15	25.841	21.075	17.630	6.034	19.528	19.617	0.727	0.509	0.355	0.008	0.333	0.553
	0.20	25.584	19.519	16.235	5.526	18.956	17.656	0.671	0.461	0.305	-0.003	0.270	0.518
	0.25	24.205	18.226	15.437	5.996	18.253	16.001	0.588	0.422	0.277	0.005	0.239	0.479
	0.30	22.439	17.028	14.786	5.650	17.709	14.543	0.491	0.379	0.252	0.004	0.201	0.442
	0.35	21.505	16.019	14.018	5.871	17.012	13.405	0.421	0.343	0.226	0.004	0.161	0.411
	0.40	19.579	15.067	13.984	6.465	16.522	12.383	0.351	0.310	0.220	0.003	0.146	0.381
	0.45	18.895	14.271	13.239	6.476	15.862	11.521	0.294	0.275	0.195	0.005	0.114	0.349
	0.50	16.955	13.501	13.286	6.814	15.414	10.695	0.244	0.250	0.194	0.008	0.102	0.326
Henri Rousseau	0	20.246	57.999	18.127	30.060	17.056	34.139	0.713	1.000	0.548	0.935	0.527	0.971
	0.10	20.482	24.518	17.434	21.350	14.499	21.865	0.714	0.792	0.484	0.701	0.398	0.734
	0.15	21.524	22.931	16.964	20.067	15.000	20.114	0.709	0.742	0.450	0.646	0.370	0.688
	0.20	21.454	21.775	16.556	19.035	14.388	18.749	0.687	0.698	0.421	0.580	0.333	0.645
	0.25	21.046	20.735	16.320	7.747	13.891	17.698	0.654	0.658	0.396	0.004	0.308	0.611
	0.30	20.951	19.724	15.988	7.583	14.295	16.696	0.611	0.608	0.365	0.008	0.278	0.570
	0.35	20.693	18.853	15.809	7.924	13.538	15.812	0.573	0.568	0.339	0.004	0.256	0.538
	0.40	20.006	18.025	15.479	7.765	13.535	15.033	0.526	0.522	0.312	0.008	0.232	0.499
	0.45	19.119	17.314	15.066	7.887	13.328	14.418	0.478	0.484	0.292	0.011	0.217	0.474
	0.50	18.486	16.653	14.788	8.124	13.284	13.807	0.433	0.439	0.267	0.016	0.193	0.433

En la Fig. 10 se observa que la red Nafnet tiene problemas para procesar la imagen cuando es una alta densidad, la red Restormer suaviza todos los impulsos generados por el ruido, pero cambia las tonalidades originales de la imagen y a su vez pierde los detalles presentes; la red DnCNN y el DA contienen aún gran cantidad de impulsos, pero mantienen las tonalidades y detalles de la imagen. En la Fig. 11 se muestra un acercamiento para apreciar con mayor detalle las observaciones previamente realizadas.

La Fig. 12 contiene las gráficas obtenidas de los resultados para cada una de las densidades utilizadas con sobre las imágenes.

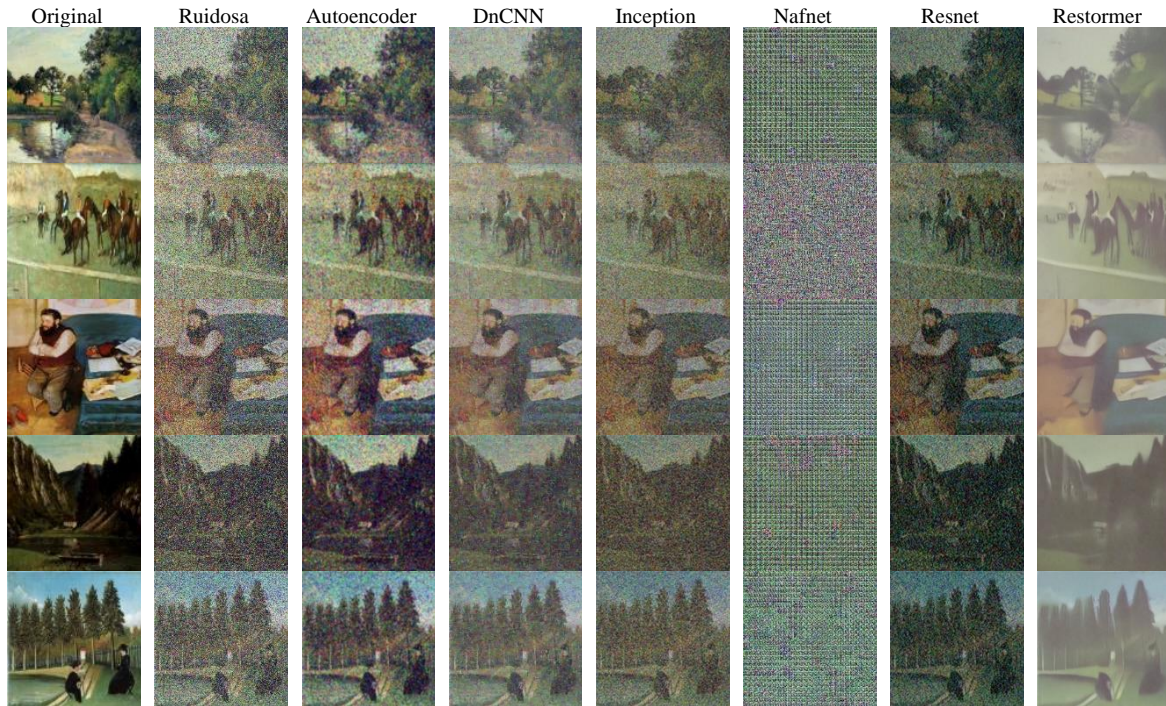


Fig. 10. Imágenes filtradas resultantes por el método analizado y de comparativo aplicados a diversas imágenes con un nivel de ruido sal y pimienta de 50%.

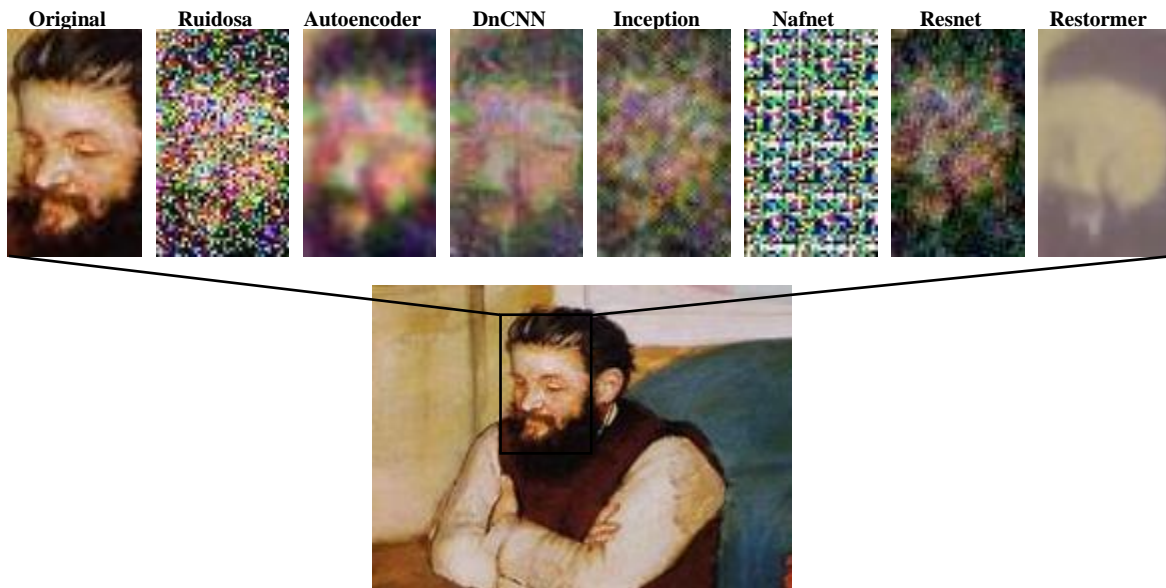


Fig. 11. Acercamiento de la imagen original contra imagen corrupta con ruido sal y pimienta e imágenes procesadas mediante diversos métodos.

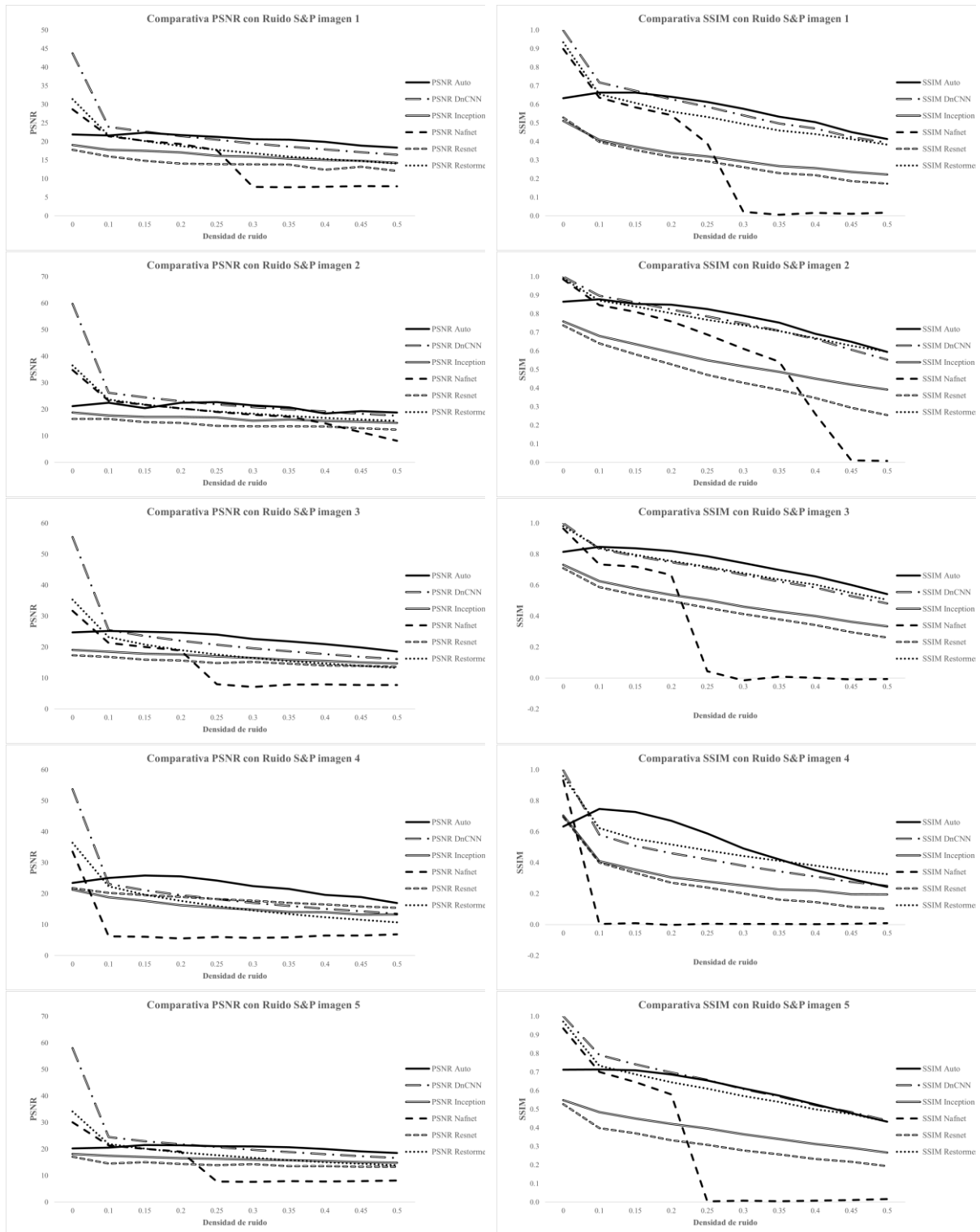


Fig. 12. Valores PSNR y SSIM para las imágenes analizadas con diversas densidades de ruido sal y pimienta.

Para el caso del ruido poisson los resultados se ven reflejados a continuación (véase Tabla 4). En la Fig. 13 se observa que las cuatro redes trabajan de manera efectiva sobre este tipo de ruido sin presentar cambios importantes que afecten el resultado final del procesamiento.

TABLA 4
VALORES PSNR Y SSIM PARA CINCO IMÁGENES CORROMPIDAS POR RUIDO POISSON.

Imagen	PSNR						SSIM					
	Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer	Autoencoder	DnCNN	Inception	Nafnet	Resnet	Restormer
1	30.323	32.332	19.012	28.761	17.643	29.865	0.934	0.945	0.501	0.893	0.519	0.904
2	29.853	31.386	18.842	32.048	16.138	33.397	0.976	0.962	0.755	0.972	0.730	0.976
3	33.755	33.059	18.908	30.755	17.334	33.115	0.968	0.957	0.723	0.950	0.704	0.963
4	26.701	36.948	21.542	33.221	21.702	34.815	0.960	0.972	0.701	0.921	0.689	0.945
5	31.017	32.863	18.107	29.537	17.087	31.790	0.966	0.965	0.544	0.927	0.521	0.951

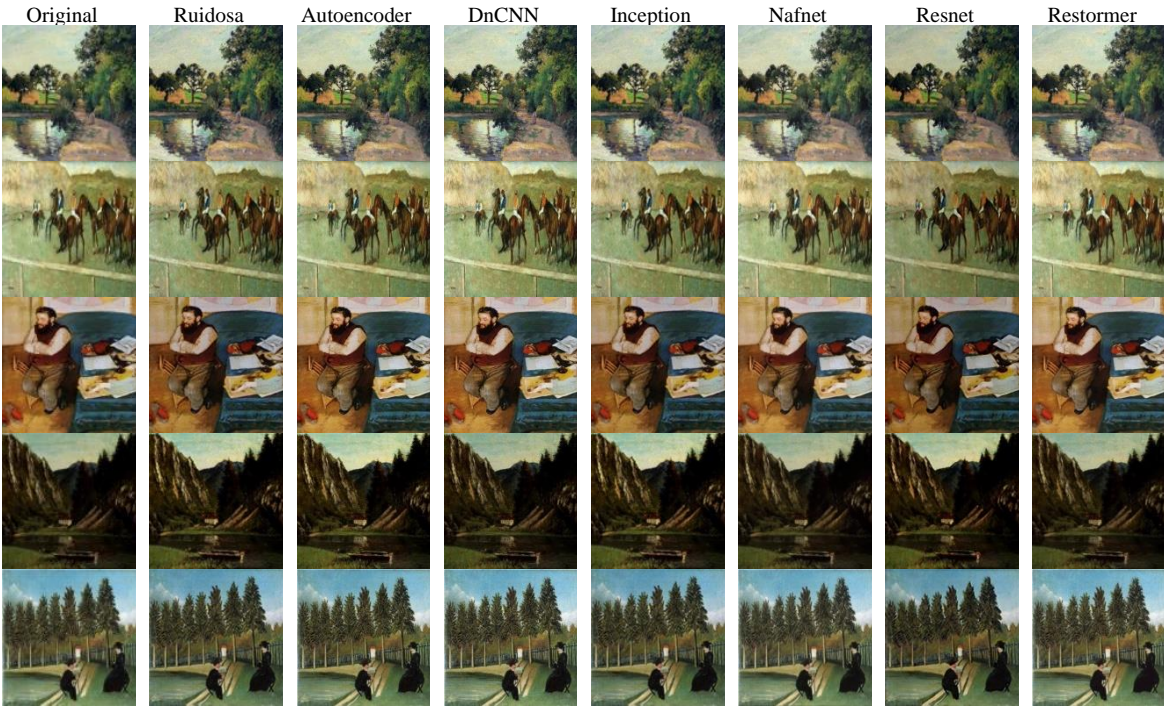


Fig. 13. Imágenes filtradas resultantes por el método analizado y de comparativo aplicados a diversas imágenes con ruido poisson.

En la Fig. 14 mediante el acercamiento se percibe que las redes Nafnet y Restormer suavizan ligeramente el área del rostro continuando la tendencia de perder detalles en la imagen cuando se presenta ruido en ella, en el caso de la red DnCNN se perciben mayor cantidad de píxeles corruptos con respecto al resultado obtenido con la red DA.

En la Fig. 15 se muestran las gráficas comparativas de las cinco imágenes con la misma densidad de ruido poisson presente.

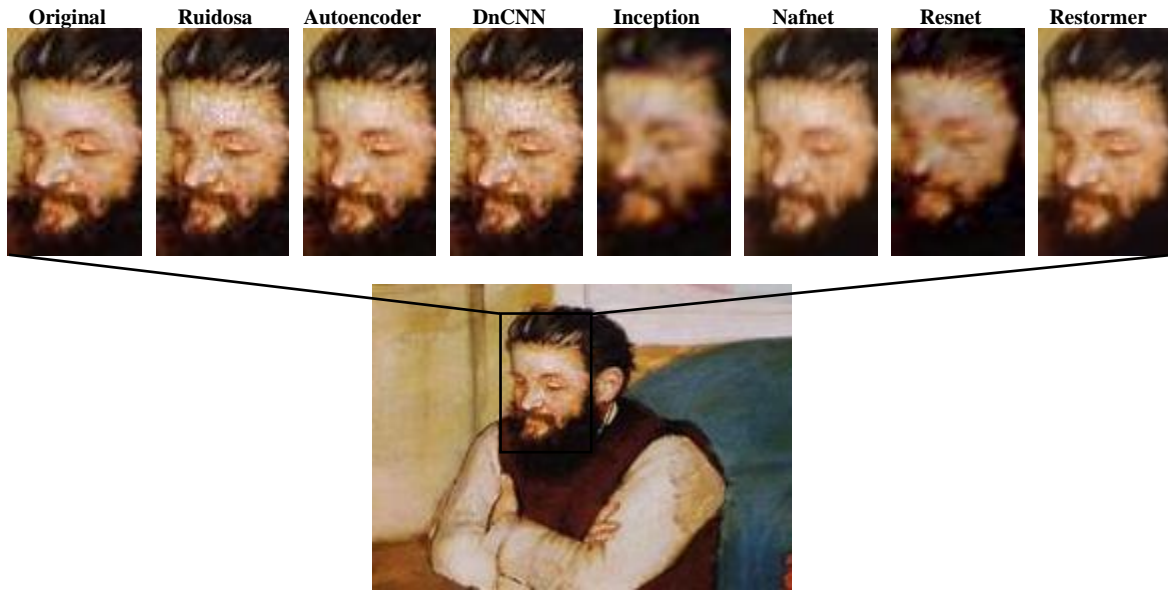


Fig. 14. Acercamiento de la imagen original contra imagen corrupta con ruido poisson e imágenes procesadas mediante diversos métodos.

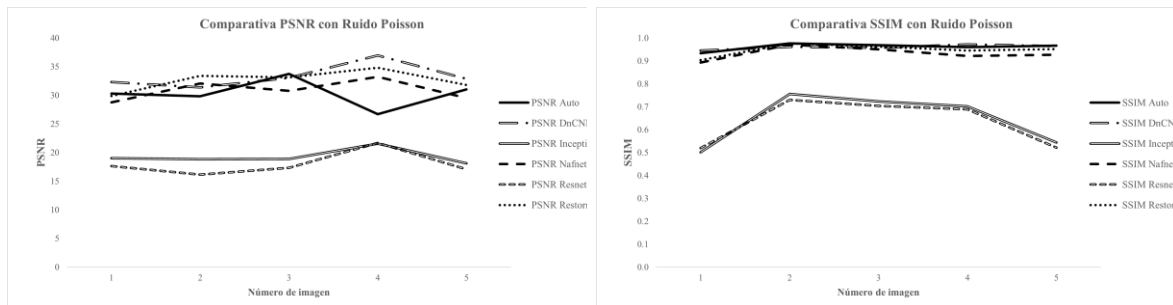


Fig. 15. Valores PSNR y SSIM para las imágenes analizadas con ruido poisson.

IV. CONCLUSIONES

Al llevar a cabo el análisis de los resultados mostrados, se identifica que, a partir del uso del DA, es posible suprimir de forma eficiente el ruido de imágenes a través de las técnicas de aprendizaje profundo independientes del tipo de ruido que corrompa la imagen, lo cual lleva a no tener que determinar un tipo de filtro en particular que pueda considerarse adecuado para situaciones específicas. Los resultados del DA muestran mejores resultados en la supresión de ruido comparado con los algoritmos DnCNN, NAFNET y Restormer para los ruidos gaussiano, moteado y sal y pimienta. En el caso del ruido poisson se observaron resultados similares en las cuatro redes analizadas, sin embargo, en la inspección visual el DA se percibe con menor cantidad de píxeles corruptos preservando los detalles de la imagen en cuestión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por el apoyo en la realización de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Limshuenchuey, R. Duangsoithong, M. Saejia, "Comparison of Image Denoising using Traditional Filter and Deep Learning Methods", *17th International Conference on Electrical Engineering/Electronics*, 2020.
- [2] V. Phomaryov, A.J. Rosales-Silva, F. Gallegos-Funes, "Fuzzy directional filter to remove impulsive noise from colour images", *IEICE Trans. Fundamentals*, pp. 570-572, 2010.
- [3] S. Schluter, A. Sheppard, Kendra Brown, *Image processing of multi-phase images obtained via x-ray microtomography: a review*, American Geophysical Union, 2014.
- [4] S. Kaur, "Noise types and various removal techniques", *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*, vol. 4, pp. 226-230, 2015.
- [5] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4a ed., Pearson, 2018.
- [6] T. Remez, R. Giryes, A. M. Bronstein, "Class-Aware Fully Convolutional Gaussian and Poisson Denoising", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 27, n.º 11, 2018.
- [7] S. Agarwal, A. Agarwal, M. Deshmukh, *Denoising Images with Varying Noises Using Autoencoders*, Springer Nature Singapore, 2020.
- [8] S. Yu, J. Príncipe, "Understanding autoencoders with information theoretic concepts", *Neural Networks*, vol. 117, pp. 104-123, 2019.
- [9] A. Pawar, "Noise reduction in images using autoencoders", *Proceedings of the Third International Conference on Intelligent Sustainable Systems*, 2020.
- [10] J. Dawani, *Hands-On Mathematics for Deep Learning*, Packt, 2020.
- [11] T. Ye, T. Wang, K. McGuinness, *Learning Multiple Views with Orthogonal Denoising Autoencoders*, Springer International, pp. 313-324, 2016.
- [12] Best Artworks of all Time, *Kaggle: Your Machine Learning and Data Science Community*, <https://www.kaggle.com/datasets/ikarus777/best-artworks-of-all-time> (acc. dec. 2022).
- [13] B. Kumar-Boyatm, "A review paper: Noise models in digital image processing", *Signal and Image Processing: An International Journal (SIPIJ)*, vol. 6, pp. 63-75, 2015.
- [14] A. Patil, A. Pramod, K. Singh, "An Approach to Image Denoising Using Autoencoders and Spatial Filters for Gaussian Noise", *11th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering*, pp. 454-458, 2021.
- [15] K. Zhang, W. Ren, W. Luo, "Deep Image Deblurring: A Survey", *International Journal of Computer Vision*, 2022.
- [16] K. Zhang, W. Zuo, Y. Chen, "Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising", *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 26, no. 7, 2017.
- [17] C. Liangyu, C. Xiaojie, Z. Xiangyu, "Simple Baselines for Image Restoration", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2022.
- [18] S. W. Zamir, A. Arora, S. Khan, "Restormer: Efficient Transformer for High-Resolution Image Restoration", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021.
- [19] C. Wickramasinghe, D. Marino, M. Manic, *ResNet Autoencoders for Unsupervised Feature Learning From High-Dimensional Data: Deep Models Resistant to Performance Degradation*, IEEE, vol. 9, 2021.
- [20] D. Wang, W. Gan, C. Yan, *Inception Model of Convolutional Auto-encoder for Image Denoising*, Springer Nature Switzerland, pp. 174-186, 2020.

Análisis de la gestión del tránsito vial mediante el modelo de sistemas viales: caso Ciudad de México

Analysis of Road Traffic Management Using the Viable System Model: Case Study – Mexico City

Sandra Luz **Morales-Guitrón**¹, Isaías **Badillo-Piña**², Katya **Rodríguez-Vázquez**³
Javier **Hernández-Hernández**⁴, Jorge Armando **Rojas-Ramírez**⁵

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-0577-6986> | slmorales@ipn.mx

² <https://orcid.org/0000-0003-4008-9161> | ibadillo@ipn.mx

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-1351-6220> | jahernandezhe@ipn.mx

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-0779-1242> | jrojasr@ipn.mx

Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO

³ <https://orcid.org/0000-0002-9413-2762> | katya.rodriguez@iimas.unam.mx

Recibido 19-10-2022, aceptado 11-01-2023.

Resumen

La congestión vehicular se ha sido una preocupación en las grandes ciudades, que afecta la calidad de vida de los habitantes de la ciudad de México (CDMX) y ralentizan la movilidad urbana. Existen varios factores a considerar que provocan la congestión vehicular, como el cambio de uso de suelo; que desencadenó zonas habitacionales en lugares inadecuados, aunque cercanos a la CDMX. La discontinuidad en los proyectos con cada cambio de gobierno, que detiene el avance en las leyes o políticas públicas y la falta de mantenimiento de las calles que provocan congestionamiento vial y otros problemas sociales.

Se realizó un análisis holístico desde la perspectiva cibernética sistémica y organizativa, usando la metodología del Modelo de Sistema Viable (MSV). Teniendo en cuenta los organismos encargados de la toma de decisiones, la elaboración de políticas y la documentación, con el objetivo de mejorar el flujo del tráfico vial desde su gestión administrativa, y que en algún momento se vea reflejado de manera operativa. Se diseñó el MSV para entender el organismo gubernamental que gestiona el flujo vehicular y la documentación correspondiente. Además, las propuestas de organismos no gubernamentales para llevar a cabo esta tarea, y se aportaron algunas ideas, especialmente en los sistemas 2 y 3*. Tras recopilar documentos de diversos organismos, nos encontramos con documentos gubernamentales dispersos y duplicados, incluso muy antiguos. Este diseño se ofrece a los interesados para detonar ideas que mejoren la gestión del tráfico vial en la CDMX, buscando reducir los congestionamientos viales.

Palabras clave: congestión vehicular, modelo de sistema viable, movilidad urbana, políticas de movilidad.

Abstract

Traffic congestion has been a concern in large cities, affecting the quality of life of the citizens of the CDMX and slowing urban mobility. There are many factors to consider that cause traffic congestion, such as the change of land use that detonated housing areas in inappropriate locations, although close to the CDMX. Discontinuity in projects with each change of government, which halts progress in laws or public policies, and the lack of street maintenance causes road congestion and other social problems. A holistic analysis was carried out from a systemic and cybernetic perspective, using the methodology of the Viable System Model (VSM). Taking into account decision-making, policy-making, and documentation to improve the flow of road traffic from its administrative management, and at some point to be reflected operationally.

The VSM was designed to understand the governmental agency that manages the traffic flow and the corresponding documentation. In addition, proposals from non-governmental agencies to carry out this task and some ideas were provided, especially in systems 2 and 3*. After collecting documents from various agencies, we found scattered and duplicated government documents, even old ones. This design is proposed to stakeholders to generate insights to improve traffic management in CDMX aimed at reducing traffic congestion.

Index terms: vehicle congestion; viable systems model; public policy; mobility; traffic control.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido de gran importancia para la humanidad incluso antes de la aparición del automóvil, ya que es base del crecimiento económico de una ciudad. Y aunque es de gran ayuda, el incremento de vehículos privados [1], la continua construcción de infraestructura para auto privado [2] y el abandono de la planificación urbana [3] han provocado congestión y atascos, deteriorando la calidad de vida de los ciudadanos [4]; la mala calidad del aire y las emisiones contaminantes [5], los accidentes de tráfico [6], pérdida de horas/hombre que se refleja pérdidas económicas [7] y el estrés de los conductores [8]

En las grandes ciudades, el tráfico vehicular está presente en casi todos los lugares donde la gente realiza sus actividades diarias y provoca numerosos fenómenos, entre los que destaca la congestión. Lo que resulta en un aumento de los tiempos de viaje y en dificultades para desplazarse. Este fenómeno suele producirse en las horas punta o pico. [9]

Durante el análisis del problema y de participar en diversos talleres, seminario, paneles y congresos relacionados al tema de la movilidad y el transporte, se conoció a los protagonistas de la movilidad a nivel gobierno y de empresas privadas, donde se tuvo la oportunidad de preguntar ¿que se estaba haciendo para mejorar el tema del tránsito vehicular?, y contestaron que ya existen varios proyectos y programas para mejorar de la movilidad del transporte y de las personas. Aquí es donde se observó que las políticas públicas y urbanas respecto a movilidad aún están en sus inicios. Se conocen muchos problemas y están bien definidos incluso se proponen soluciones, hay muchas ideas y se trabaja en políticas públicas, pero a veces no son tomadas en cuenta o bien no hay recursos para llevar a cabo el proyecto o programa. Es aquí donde los retos comienzan, la ciencia de sistema y/o pensamiento sistémico tiene las herramientas, para tomar un papel fundamental el análisis de este problema.

Aquí se propone usar el modelo de sistema viable para la gestión del tránsito vehicular de la Ciudad de México, con el objetivo de destacar algunos problemas provocados por flujo vehicular y dentro del mismo sistema determinar otras variables que incrementan la congestión vial.

II. DESARROLLO

A. Sobre el tránsito de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Según el último inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) hasta el 2018 el transporte es la primera causa de contaminación, la mayoría es transporte privado como automóviles, camionetas y motocicletas que en conjunto representan el 89.4% del parque vehicular en su mayoría a gasolina, de carga el 5.1% y de transporte público el 5.5%. [10] De los cuales el transporte privado es el que menos personas transporta y el que más emisiones contaminantes emite.

El Gobierno de la Ciudad de México se dio a la tarea de promover y redefinir de varias políticas de transporte urbano, tradicionalmente centradas en la circulación de vehículos y la gestión de flujos y tráfico, y se está consolidando un enfoque integral y humano basado en la movilidad sostenible. [11]. Razón principal de aprobar el “Programa Integral de Movilidad” en la CDMX. [12]

Para el 2015, los habitantes de la CDMX perdían el 59% de su tiempo atascados en el tráfico, y hasta el 103% en la hora punta de la tarde, lo que suma 227 horas más de tráfico al año. En ese entonces le seguían en el ranking Bangkok (57%), Estambul (50%), Río de Janeiro (47%) y Moscú (44%), siendo las más congestionadas del mundo. Según el Índice de Tráfico de TomTom, la congestión del tráfico aumentó un 13% en todo el mundo entre 2008 y 2016, tal y como se recoge en el Índice de Tráfico de TomTom [13] y publicado en otros medios de comunicación. Para 2016, la cifra de tiempo diario perdido en atascos de tráfico aumentó a 66%, y hasta 101% en horas pico, lo que equivale a 227 horas de viaje extra en un año, lo que convierte a la Ciudad de México en una de las ciudades más congestionadas del mundo comparándose con Bangkok (61%), Yakarta (58%), Chongqing (52%), de acuerdo con el Índice de Tráfico TomTom [14]. En 2017, esta cifra bajó a 52%, pero la CDMX se ubicó en el octavo lugar del ranking mundial de congestión; para 2018, continuó en 52% de congestionamiento vehicular, ubicándose en el noveno lugar del ranking mundial. En 2019 mantuvo el

52% y pasó al decimotercer lugar, pero obtuvo el primer lugar en América del Norte, separándose de los 10 primeros lugares que ese año reportó TomTom Traffic Index que mide y analiza 416 ciudades de 57 países del mundo [15]. Además, con la entrada de la pandemia del coronavirus en México en 2020 como nueva variable, provocó una disminución de la movilidad por un tiempo, ya que la congestión también disminuyó en un 16%, bajando a un 36% de congestión vehicular, colocando a México en el lugar 29 del ranking de las ciudades más congestionadas [16]. Si bien esto puede parecer una buena noticia, no lo es, ya que México mantiene el primer lugar en América del Norte, y hasta marzo de 2021, mantuvo los porcentajes exactos [17]. Según la Subsecretaría de Control de Tráfico, desde el inicio de la pandemia se detectó una disminución del tráfico vehicular de 61% a las 8 de la mañana y 49% a las 6 de la tarde, típicas horas pico [18]. Sin embargo, en el último trimestre de 2020, donde el semáforo epidemiológico cambió de naranja a rojo, el porcentaje medio diario cambió al 45% [19]. Es fundamental revisar el análisis realizado por el "Instituto Mexicano para la Competitividad A. C." (IMCO) y "SIN-TRAFICO", ya que realizaron el primer estudio nacional del costo de la congestión 2018, el cual aclara cuánto cuesta la congestión vial en México, dando una cifra de 93,867,687,000.00 MXN para todo el país. La "Zona Metropolitana del Valle de México" (ZMVM) gasta MXN 47,043,636,087, poco más de la mitad que toda la república; de esto, MXN 10,809,681,509.00 se gastan en autos particulares y MXN 36,233,954,574,578.00 en transporte público. Como es bien sabido, "la congestión del tráfico cuesta tiempo, calidad de vida, competitividad y desarrollo económico" [7]. Este estudio muestra que la inversión en transporte público fue escasa, que la infraestructura para los autos particulares aumentó y ante la falta de seguridad en la CDMX la gente compro vehículos privados.

La CDMX y el Estado de México (EDOMEX) se encuentran dentro de un extenso sistema, la ZMVM, donde ambas zonas están interrelacionadas. Muchas personas viven en el EDOMEX y trabajan o estudian en la CDMX. De acuerdo con la "Encuesta Origen-Destino 2017 de la ZMVM", se realizan 34,560,000.00 traslados metropolitanos al día, de los cuales 7,290,000.00 son en transporte privado, 15,570,000.00 son en transporte público, y la diferencia son otros tipos de transporte entre la CDMX y los municipios conurbados que no sólo causan problemas de congestión vehicular. La ZMVM cuenta con más de 5,900,000.00 hogares, donde 41 de cada 100 familias poseen al menos un automóvil o camioneta (2,450,000.00). De los 7,290,000.00 desplazamientos en transporte privado, más del 90% se realizan en coche o furgoneta, transportando sólo a 1,5 personas por coche, lo que significa que, de los 6,600,000 desplazamientos en coche, sólo en el 90,5% el conductor parte como máximo con otra persona. Este estudio muestra cómo el transporte privado mueve menos personas, con casi la mitad de vehículos que el transporte público, lo que se traduce en congestión del tráfico, polución medioambiental, etc. [20]. El "Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP) de la Cámara de diputados de la LXIII Legislatura" realizó encuestas. En 2017, los resultados de una encuesta telefónica sobre movilidad y medio ambiente, en la que se realizaron 900 entrevistas, mostraron que el 88,7% de las personas considera que hay mucho o algo de tráfico y el 11% considera que hay poco o nada de tráfico. El 74,9% utiliza el transporte público, el 24,2% el coche privado, el 1,2% el taxi y el resto otros medios de transporte. Un 71,3% piensa que es inseguro viajar en transporte público, y un 63,4% considera que las agresiones son un riesgo en el transporte público, entre otros datos [21]. En 2016, realizaron otra encuesta telefónica, en la que proponen el escalonamiento de los horarios para dispersar la densidad y la concentración del flujo de tráfico, que provocan diversos problemas. Un 77,7% de los 601 encuestados dijo no saber nada de la propuesta, y cuando se enteró, el 69% dio su aprobación. Además, el 57% pensaba que la puesta en marcha de los horarios escalonados reduciría ese tráfico, el 51% pensaba que disminuirían los accidentes de tráfico y el 55,4% pensaba que aumentaría la productividad [22].

La información proporcionada por las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales es esencial. Muestra el caos vial en la CDMX que, a pesar de los esfuerzos por gestionar el flujo de vehículos con semáforos y agentes de tránsito, es extremo. El reglamento de tránsito muchas veces no se cumple debido a la gran cantidad de autos que también afectan a los peatones, ciclistas, motociclistas y nuevas formas de movilidad. Sin embargo, hace más de dos años que se pasó de semáforos manuales a semáforos inteligentes, con el objetivo de modernizar y agilizar el flujo de tráfico [23]; sin embargo, no hay resultados concluyentes.

Los peatones a veces tienen que caminar por debajo de la banqueta en algunas regiones de la CDMX debido a los puestos de vendedores que se adueñan de las calles para su actividad comercial. Esto obliga a conductores y peatones a compartir un tramo de la vía; los peatones tienen que cuidarse de los autos y los autos de los peatones. Por estas razones y otras viejas costumbres en la CDMX, se cambió el nombre de SETRAVI ("Secretaría de Transporte y Vialidad") a SEMOVI ("Secretaría de Movilidad"), y se implementó una ley de movilidad en la CDMX con el objetivo de dar voz y derechos a las personas que utilizan todo tipo de transporte [24].

El libro "Política de movilidad sustentable en la CDMX" de Laura Ballesteros, ex subsecretaria de Planeación de la Secretaría de Movilidad, propuso implementar algunas leyes para mejorar la movilidad y aumentar el nivel de vida de los usuarios, de las cuales el "Congreso de la Unión" aceptó varias. Estas podrían definirse en el reglamento de tránsito o en la constitución [11] en algún momento. El 18 de diciembre de 2020 se publicó en el "Diario Oficial de la Federación" (DOF) el decreto de reforma en materia de Movilidad y Seguridad Vial [25].

Se recopiló información mediante el estudio de boletines oficiales [26,27], guías [28], manuales [29], planes [30,31,32], informes [20], reglamentos [33] y estadísticas [7,21,22], entre otros. Además, se podría recopilar información y opiniones en diversos eventos, como congresos [34,35], charlas y seminarios web sobre tráfico vehicular a los que asisten expertos en la materia, responsables de la toma de decisiones y diseñadores de soluciones, algunos de los cuales podrían ser entrevistados.

En este sentido, observamos que la política pública de movilidad en México aún está en sus inicios. Muchos de los problemas son conocidos y están bien definidos, y si bien hay muchas ideas respecto a las soluciones, a veces no se toman en cuenta, o no hay recursos para llevar a cabo el proyecto o programa. Así comienzan los retos; la ciencia de los sistemas y el pensamiento sistémico pueden desempeñar un papel fundamental en el análisis de este problema.

Uno de los objetivos de la investigación es localizar algunas de las patologías del sistema vial, que pueden ser otras causas de la congestión vehicular en la CDMX. El análisis del problema es un sistema complejo debido a las diferentes variables o estados que se deben considerar; por ejemplo, el aumento de la población, las nuevas formas de moverse dentro de la CDMX (patinetes eléctricos y sus derivados), y otros problemas aumentan su complejidad.

En el pasado, y aún hoy, estos sistemas complejos se abordaban desde un enfoque epistemológico analítico reduccionista; es decir, se dividía el problema en piezas y no se tomaban en cuenta las interacciones. El pensamiento sistémico y cibernético nos permite ver este problema desde otra perspectiva para determinar las interrelaciones y el entorno. Para el problema del tráfico vehicular, el modelo de sistema viable (MVS) es ideal para identificar y analizar las deficiencias que causan la congestión del tráfico, y pueden ser formalizadas con este método científico.

B. Literatura técnica revisada

Además del todo el material revisado para comprender el problema de la congestión vehicular nos tomamos a la tarea de mostrar que el uso del modelo es amplio, por ejemplo, el MVS se utiliza en el sector bancario y en la complejidad de las empresas [36], así como en la determinación de la estructura organizativa de una empresa de ingeniería de la construcción en Irán [37], en la mejora de la producción de caña de azúcar [38] o bien como herramienta para diseñar y diagnosticar la gestión de tecnologías de la información en un centro de datos [39], viendo al sistema financiero como un holón donde está la banca comercial ofreciendo inversiones afectados por el mercado[40]; estos, y otros ejemplos, muestran la flexibilidad del MVS. Pero no hemos localizado literatura que use el modelo de sistema viable para gestionar del tránsito vehicular, la información que existe usan diversas tecnologías. La mayoría de los trabajos buscan pronosticar la congestión, controlar y evitar embotellamientos con diversas tecnologías por ejemplo realizando encuestas graficas de videos en horas pico y como resultado sugirieron posibles medidas paliativa [41]. El siguiente trabajo realizando una comparativa de varios artículos de diversas metodologías como aprendizaje máquina, lógica fuzzy, optimización y simulación aplicado a sistemas de transporte sostenible [42]. Ahora bien, también existen estudio desde el aspecto geo social, ya que

el tráfico vial es tema que genera muchos mensajes en las redes sociales para informar sobre eventos de tráfico, que puede ser explotada para extraer información y adquirir conocimiento [43]. Como podemos ver hay muchas herramientas para el análisis de tránsito vial como el siguiente trabajo donde se ofrece una visión general de las técnicas de procesamiento de datos relacionadas y se resumen los métodos existentes para representar las propiedades temporales, espaciales, numéricas y categóricas de los datos de tráfico, propiedades temporales, espaciales, numéricas y categóricas de los datos de tráfico [44]. Un trabajo más cercano al enfoque de la sistémica es este donde con un enfoque cibernético observan el problema de circulación vehicular desde la señalética proponiendo un ciclo cibernético entre el sistema control (señalización) y la parte operativa (conductor) [45].

5

C. Aplicación de Modelo de Sistema Viable

Se realizó un diagrama de la complejidad desplegada del sistema, con la estructura del tráfico vehicular (véase Fig. 1) dividida en su eje vertical (separando el entorno en subsistemas o sistemas más pequeños contenidos en el inicial y, por tanto, uno tras otros situados dentro de otro, pero a una escala aún más pequeña); cada subsistema corresponde a organizaciones más pequeñas, lo que lo hace más manejable. Estos subsistemas no son componentes de un sistema, sino que son en sí mismos un sistema viable [46], [47].

El diagrama muestra una figura en cascada de tres niveles de complejidad comenzando en el nivel 0 con la Ciudad de México, la ubicación del estudio, luego el nivel 1, donde se extrajeron los cinco sistemas centrales para la gestión del tráfico vehicular en la CDMX. A continuación, el nivel 2 muestra los subsistemas que conforman el nivel 1; éstos organizan y especializan la gestión del tráfico vehicular. Finalmente, en el nivel 3 se desglosan los elementos a gestionar por el subsistema. Esta figura no muestra una jerarquía en sí misma, sino un desglose consecutivo de los subsistemas viables involucrados.

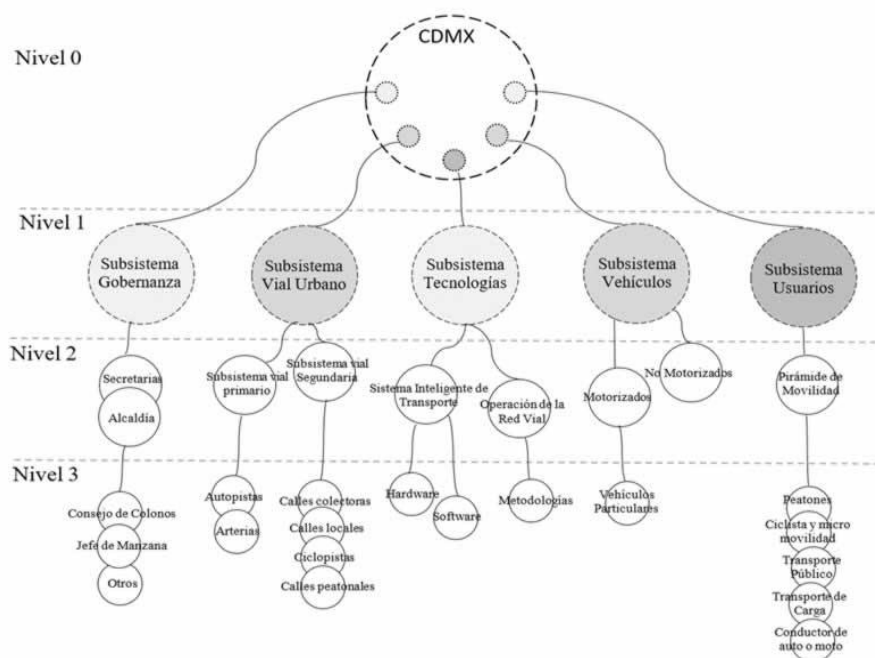


Fig. 1. Desglose de la complejidad. (Dimensión vertical) elaboración propia basada en [47].

Aquí se identifican las unidades operativas, cada una de las cuales constituye por sí misma un sistema viable debido a su carácter recurrente. Por sus características, se considera una parte crucial de este trabajo, [48]. Estas S1(Sistema 1) son las que establecen los principales actores, ya que coordinan, legislan, regulan, vigilan y administran el tráfico vehicular como servicio a la CDMX. Cada una de estas unidades operativas es autónoma, pero debe trabajar en conjunto para responder a las necesidades de organización de la CDMX. Cada unidad operativa se compone de tres elementos:

- El entorno: representado como una ameba;
- La operación: representada como una elipse;
- El metasistema: representado como un rectángulo.

Existen otros mecanismos de gestión de la complejidad: el atenuador y el amplificador de la variedad, que se regulan internamente y se representan como flechas unidas en una dimensión horizontal. Los atenuadores reducen la variedad, y la amplificación permite ampliar la capacidad de una organización.

1A: Sistema Vial Urbano

El sistema vial urbano es el soporte principal del flujo generado por la actividad urbana y vehicular; se encuentra dentro de un área urbanizada y comprende la red de calles o redes viales por donde se desplazan las personas y los vehículos motorizados (o no). Según la capacidad, la función, la forma y el uso de la vía, o según los requerimientos de los usuarios de la misma [29], el crecimiento económico y social del área que rodea a las carreteras es esencial. Así, su continuidad y funcionamiento óptimo representan presiones para las autoridades y los operadores de la red de carreteras en las zonas de congestión del tráfico. Además, la supervisión de la red, su funcionamiento y los servicios que se prestan a los viajeros y usuarios de la carretera son factores que también deben tenerse en cuenta (véase Fig. 2) [49].

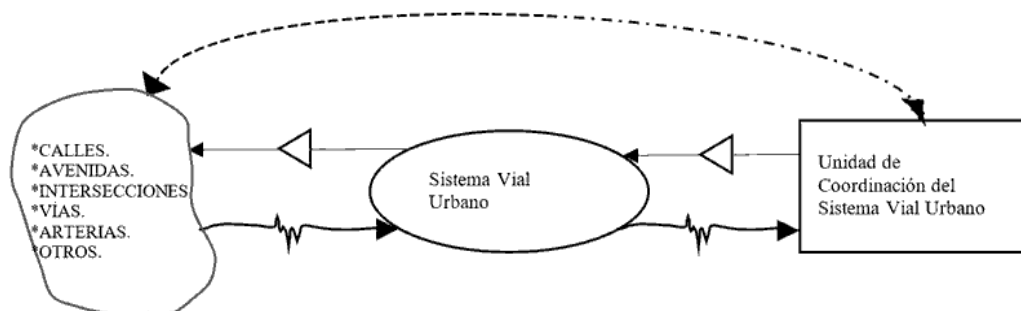


Fig. 2. Sistema vial Urbano elaboración propia basada en [48]

1B: Sistema de Gobernanza

El sistema de gobernanza se encarga de guiar o dirigir a una sociedad que ocupa un área geográfica a través de reglas o políticas colectivas para buscar el bien común; se divide en diferentes áreas, como salud, educación y movilidad. Para gobernar cada rubro, es necesario subdividirlo en secretarías y órganos autónomos, que abarcan diferentes regiones dentro de la CDMX y fuera de ella (véase Fig. 3).

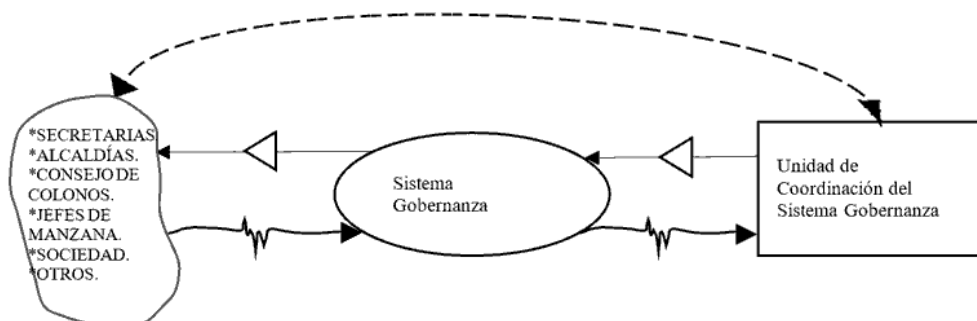


Fig. 3. Sistema Gobernanza elaboración propia basada en [48]

1C: Sistema de Usuarios

Este sistema se refiere a las personas que utilizan un producto o servicio; en este caso concreto, se refiere a la utilización del sistema vial urbano, ya sea en un vehículo motorizado o no, para desplazarse de un lugar a otro. En la pirámide de la movilidad, la vulnerabilidad de cada usuario se define a través de jerarquías. Durante años, la alta prioridad otorgada a los vehículos privados ha afectado a la infraestructura vial (véase Fig. 4).

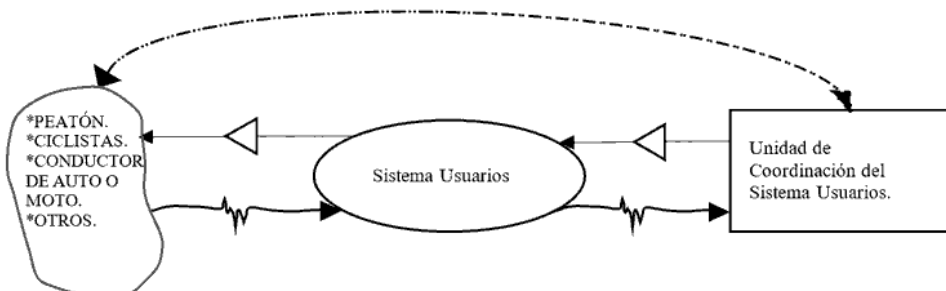


Fig. 4. Sistema Usuarios elaboración propia basada en [48]

1D: Sistema Vehicular

El sistema vehicular se refiere a los medios de transporte utilizados en la Ciudad de México para trasladarse de un lugar a otro y se categoriza en motorizados y no motorizados. De éstos, los que más problemas causan a la ciudad son los automóviles particulares, como se muestra en la Figura 5.

Los vehículos motorizados son vehículos de transporte terrestre de pasajeros o de carga, o vehículos privados que dependen de un motor para su movilidad [50].

Los vehículos no motorizados requieren la fuerza humana para moverse y tienen una velocidad máxima de 25 km/h [51].

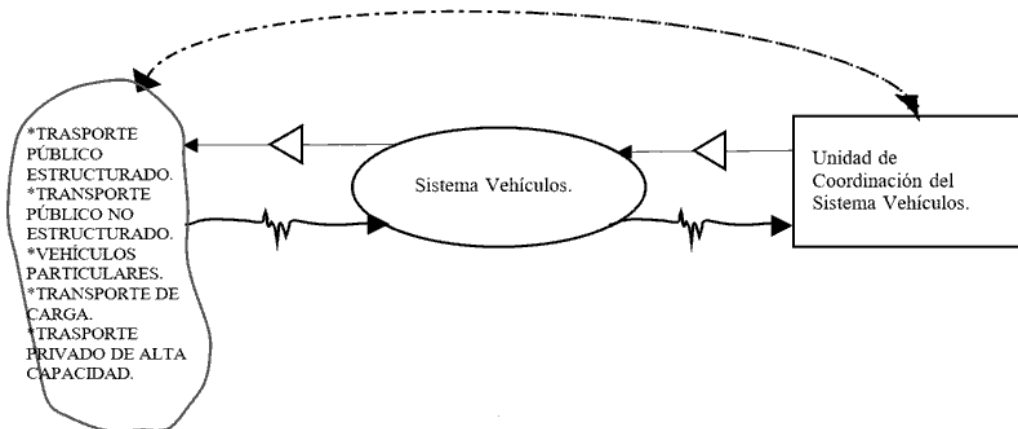


Fig. 5. Sistema Vehículos Particulares elaboración propia basada en [48]

1E: Sistema Tecnologías

Una red de carreteras tiene varias operaciones, como la supervisión de la red, la explotación de la red, el control del tráfico, la gestión de la demanda y los servicios al viajero y al usuario. Los sistemas de transporte inteligentes (STI) se integran ahora en cada una de estas operaciones, lo que significa que se dispone de más herramientas de software y hardware para la explotación eficiente de la red de carreteras. "Los STI son sistemas de control e información que utilizan tecnologías de procesamiento de datos y comunicaciones de forma integrada para mejorar el flujo del tráfico, reducir la congestión, reducir la contaminación y gestionar la demanda y el control del tráfico" [49]. Para proporcionar información al responsable de la toma de decisiones, al conductor o a otros usuarios, esto repercute en el rendimiento de las operaciones de la red día a día y convierte el crecimiento económico de la población.

Los ITS cuentan con varias tecnologías para lograr sus objetivos, como la tecnología de procesamiento, gestión y archivo de datos, la tecnología de detección, la tecnología de comunicación, la tecnología de difusión de información, la tecnología de posicionamiento y localización referencial, la tecnología de control de vehículos y la tecnología de control de tráfico, así como la tecnología de pago electrónico, la tecnología de aplicación y la tecnología de supervisión. En la Ciudad de México, algunas tecnologías ya están en funcionamiento; hay 1.850 semáforos inteligentes operados a distancia para mantener la fluidez y la seguridad en varias intersecciones viales en la CDMX [23,52,53]. Hay 341 sensores y 84 videodetectores para determinar el aforo, la velocidad, la ocupación y el tipo de vehículos [54], aunque estos dispositivos fueron dados de baja por sus altos costos y por ser inservibles, según una fuente de la SEMOVI. En marzo de 2019 se puso en funcionamiento el carril reversible del circuito interior, de norte a sur, lo cual fue apoyado por un software de simulación. Con esto, podemos ver la importancia del uso de tecnologías para la gestión del tráfico (véase Fig. 6) [55].

9

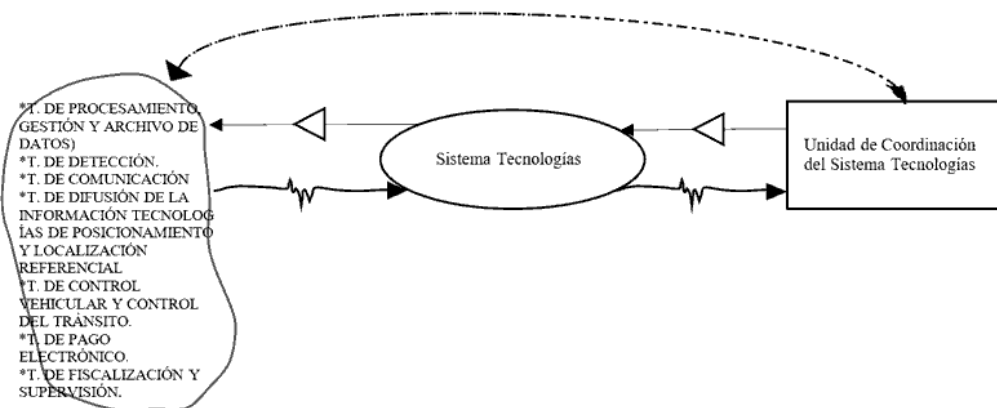


Fig. 6. Sistema Tecnológico elaboración propia basada en [48]

Sistema 2 (S2)

El S2 tiene la función de coordinar al máximo las unidades operativas del S1 para que trabajen conjuntamente a través de reuniones, foros, mesas de trabajo, protocolos, procedimientos, políticas, programas, planes, seguimientos, informes, manuales, flujogramas, archivos, mapas, entre otros. El S2 maneja varias normas y reglamentos que son esenciales para que el sistema funcione correctamente y para que las unidades operativas se adapten entre sí de manera eficiente, ya que la actividad de una unidad operativa repercute en las demás, evitando así perturbaciones en el sistema. Todas las unidades y la resolución de conflictos deben ser estables porque cada unidad necesita alcanzar sus objetivos. Aunque el S2 aplica las políticas y decisiones administrativamente, no las genera.

Todos estos elementos son mecanismos que se definieron para coordinar estratégicamente la gestión del tráfico de vehículos. Las acciones y las relaciones comunes entre los elementos, la fuente de información y la coordinación de las tareas se basan en gacetas oficiales y actas de trabajo después de cada reunión interdepartamental o incluso con organismos externos identificados. Cada elemento permitirá que estos dos sistemas trabajen juntos de la manera más organizada y coordinada posible para garantizar que no haya conflictos entre ellos.

El S2 se encarga de implementar leyes, reglamentos y políticas de diversa índole, como la Ley de Movilidad de la CDMX, el reglamento de tránsito, la declaratoria del derecho a la movilidad, entre otros; todos estos elementos son los pilares de la gestión del tránsito y fueron creados por las autoridades para manejar una gran variedad de problemas derivados de las interacciones de los reglamentos con los ciudadanos en la gestión del tránsito y la movilidad.

La figura 7 presenta la coordinación del S2 en la gestión del tráfico de vehículos y las acciones relevantes o que pueden serlo en el futuro.

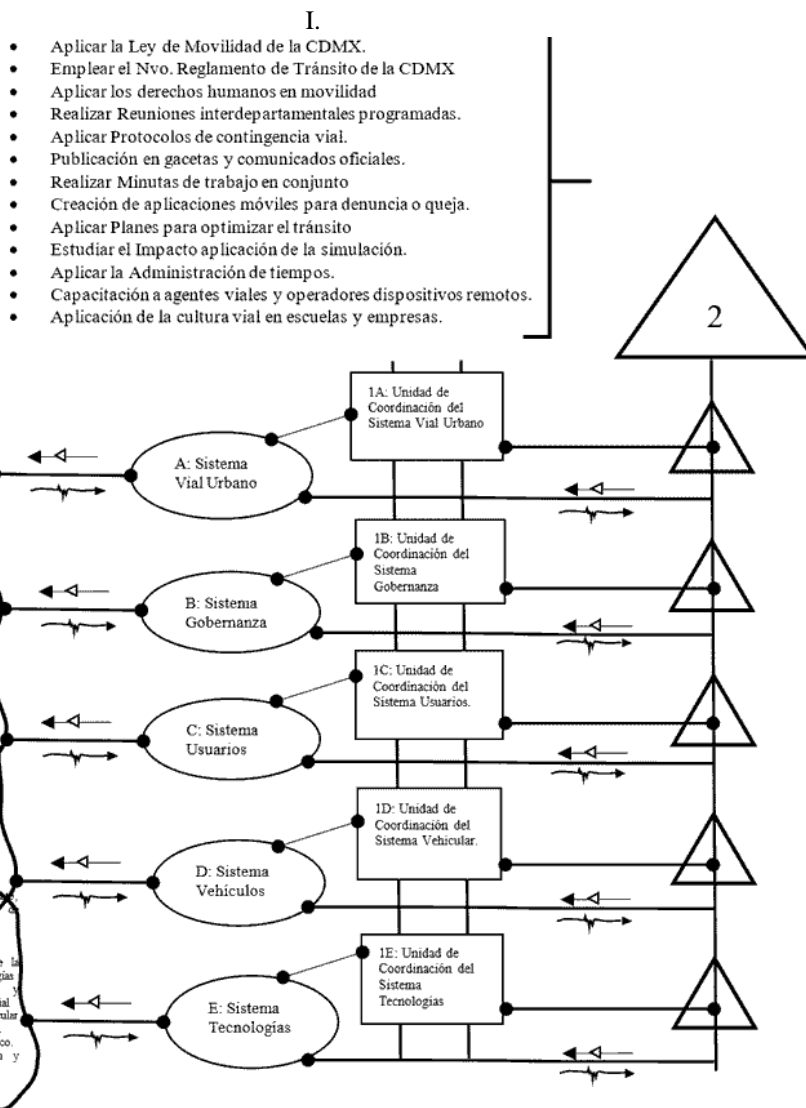


Fig. 7. Diagrama de la función de coordinación o Sistema 2 elaboración propia basada en [48]

Sistema 3 (S3)

El S3 busca optimizar el S1 y crear sinergias porque es responsable de las acciones internas e inmediatas del sistema, del "aquí y ahora". S3 dispone de canales diferentes a los de S1, pero no debe intervenir directamente sobre S1, ya que para eso está S2; así, S3 tiene una posición favorecida ya que tiene acceso a información privilegiada, pero no debe utilizarla demasiado ya que le restaría validez. S3 forma parte del nivel corporativo y es el encargado de transmitir los mandatos y políticas a S2 y, al mismo tiempo, es el receptor de la información de auditoría de S3*, lo que, según Beer, ayuda a conseguir el equilibrio aplicando la ley de variedad de Ashby entre S3 y S1. Así, S3* asimilaría la variedad restante, que es estabilizada por S2, así como el control, la entrega de recursos y la responsabilidad [56]. S3* colabora en la realización de auditorías para garantizar la consecución de los objetivos asignados a S1. En este caso, la "Secretaría de Seguridad Ciudadana" (SSC) a través de la

"Subsecretaría del control de tránsito", en conjunto con la "Secretaría de Movilidad" y otras dependencias, es la responsable de actuar de manera inmediata ante cualquier situación que provoque congestión vehicular y de habilitar la operación, como se muestra en la Figura 8.

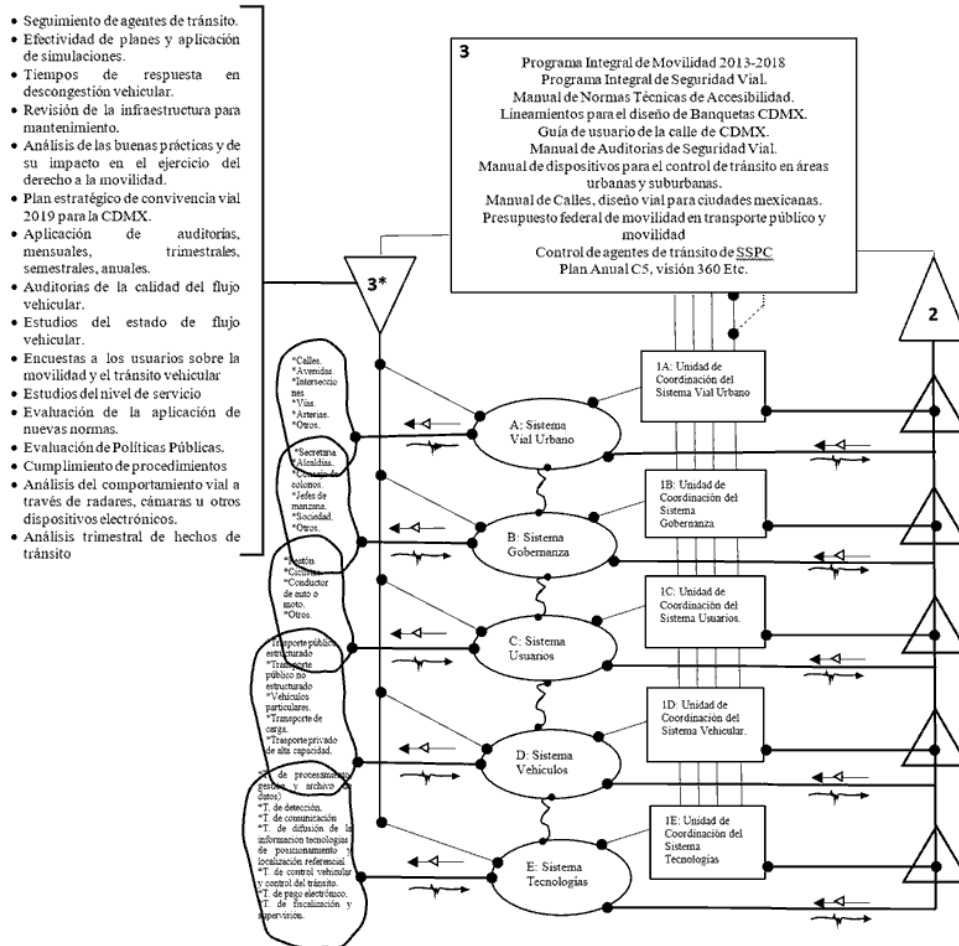


Fig. 8. Diagrama de la función de control o Sistema 3 elaboración propia basada en [48]

Sistema 4 (S4)

El S4 se preocupa principalmente por el futuro y el entorno externo de la organización, priorizando el cumplimiento de sus objetivos a lo largo del tiempo en diversas circunstancias. En cuanto a los homeostatos de S3 y S4, el de S3 está atento al "aquí y ahora" de la organización, mientras que el de S4 mira al "futuro y hacia fuera" y se preocupa de que S3 pueda implementar cambios y reformas en S1 para asegurar su continuidad en el futuro. Es crucial lograr una buena conexión entre S3 y S4 a pesar de sus diferencias, por lo que es imprescindible encontrar herramientas de comunicación que puedan utilizarse entre estos dos. Por ello, "Beer" creó Team Syntegrity [46] para facilitar la comunicación en cualquier ámbito, aunque se puede utilizar otra técnica o metodología.

A pesar de la aplicación de técnicas o metodologías de comunicación, no siempre se obtiene un acuerdo unánime, y es entonces cuando entra en juego el S5, del que hablaremos más adelante. Para la posición de S4,

"Beer propone que se convierta en la sala de operaciones de la organización, un verdadero entorno de toma de decisiones" [67].

Es esencial integrar las nuevas tecnologías para resolver los problemas de la ciudad debido a los diversos cambios políticos, económicos, culturales y sociales que afectan a la vida cotidiana de la ciudad para lograr una gestión óptima del tráfico. Es necesario estudiar el entorno, y aquí es donde se han encontrado las diferentes integraciones con el entorno externo y su correspondencia con el Sistema cinco.

La Secretaría de Movilidad (SEMOVI) debe formar parte de este sistema porque es la que coordina y mira hacia el futuro, además de elaborar políticas públicas y programas y organizar, orientar, controlar, vigilar, aprobar y modificar el desarrollo de la movilidad y el transporte. Además, está a la vanguardia de la tecnología para captar y almacenar información sobre el tráfico de vehículos, entre otras tareas. También debe coordinar con las secretarías encargadas de la gestión vehicular, como la "Subsecretaría de Tránsito, Secretaría de Obras Públicas", entre otras.

El "Centro de Comando, Control, Cómputo, Comunicaciones y Contacto Ciudadano de la CDMX", o C5, debe ser parte de la S4, ya que puede ver hacia afuera y capturar información, y es útil para la toma de decisiones en emergencias médicas, tareas relacionadas con el medio ambiente, protección civil y servicios de movilidad y comunitarios en la capital del país. A través de la videovigilancia, la captura de llamadas telefónicas y las aplicaciones de inteligencia, se centra en mejorar la calidad de vida de los ciudadanos de la capital. Está a la vanguardia del desarrollo tecnológico y capta una gran cantidad de datos. De hecho, uno de los retos es conseguir una base de datos única y consolidada de eventos de tráfico a partir de las distintas fuentes disponibles [57].

Supongamos que la SEMOVI, la SSC y el C5 CDMX se integran en el S4. En este caso, no absorbe (resuelve) la variabilidad (problemas) en su totalidad porque su objetivo principal es la seguridad y calidad de vida de los ciudadanos. Hasta ahora, el C5 no tiene como prioridad la gestión del tráfico; no se interesa por los acontecimientos ordinarios que pueden desencadenar la congestión del tráfico. Por ejemplo, los limpiadores de parabrisas suelen parar los coches, la gente vende productos entre los coches y varios artistas trabajan en los pasos de cebra de los peatones y caminan entre los vehículos. Además, los baches y badenes ralentizan la circulación y suponen un peligro para quienes se mueven dentro del carril de vehículos.

La ciudadanía, al no conocer un servicio confiable con el cual reportar eventos de tránsito que no consuma tiempo, ha recurrido a Twitter y Facebook a las cuentas de las secretarías correlativas, como @072GDF, @SOBSECDMX, @OVIALCDMX, @GobCDMX, @C5_CDMX, @SSC_CDMX, y @LaSEMOVI, entre otras redes sociales, generando información no estructurada [57].

El C5 es muy eficiente en la atención de incidentes de seguridad en la vía pública, como asaltos, accidentes viales, botones de emergencia, bloqueos, etc. Actúa de inmediato para resolverlos, como lo demuestran varios videos en Twitter o YouTube del C5 CDMX. Entre sus actividades, proporciona información sobre el tráfico vehicular a través de cámaras de video.

En general, por las características y recursos con los que cuenta el C5, podría ser la sala de operaciones, ya que sus aspectos técnicos le permiten recabar diferentes datos para la toma de decisiones de los funcionarios. Tanto el C5 como la SSC y la SEMOVI cuentan con información histórica y actual para realizar este ejercicio, como se muestra en la Figura 9.

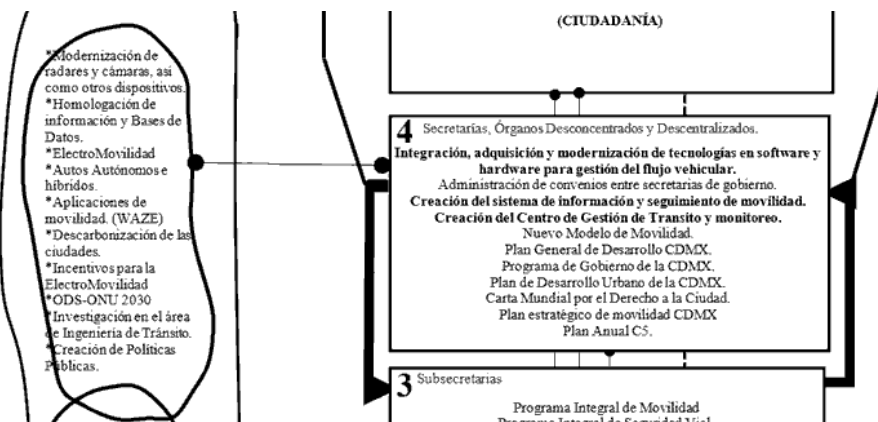


Fig. 9. Diagrama de la función de inteligencia o Sistema 4, elaboración propia basada en [48].

Sistema 5 (S5)

S5 es el encargado de gestionar la dirección haciendo políticas de interacción entre S4 y S3 para resolver todos los problemas del homeostasis, según la ley de Ashby. S5 también está obligado a hacer que la organización se adapte al entorno externo cuando sea necesario y a mantener el equilibrio del entorno interno, valorando el presente y el futuro de la organización, ya que debe comprometerse a establecer la misión, la visión y los objetivos de la organización.

Los elementos políticos ya están bien definidos porque existen en los planes de trabajo de la CDMX, por lo que debemos acatarlos. Sin embargo, eso no significa que en el futuro no se propongan nuevas políticas para mejorar el tránsito y la movilidad en la ciudad (los planes existen, pero no siempre se aplican y menos aún llegan a los ciudadanos). Otra variable es que los reglamentos, estatutos, políticas, etc., muchas veces no se actualizan y no se ajustan a la realidad siempre cambiante de la CDMX. Falta una revisión constante para mantenerlos al día.

Para los Sistemas S3 y S4, es necesario considerar los consejos u opiniones de la población que utiliza diariamente las vías de circulación vehicular y peatonal.

Aquí es fundamental incluir a los ciudadanos que no opinan por falta de información, ya que existen programas de creación de políticas públicas y urbanas para mejorar las ciudades donde se requiere el apoyo de los ciudadanos. Sin embargo, estas convocatorias sólo llegan a un número limitado de personas, o hay poca publicidad.

No sólo los usuarios de automóviles, sino también los peatones, los ciclistas, los motociclistas y los usuarios de vehículos alternativos deberían participar. En general, los ciudadanos no se implican porque hay una falta de confianza en las instituciones. "Cuando no hay confianza, es porque las instituciones no están cumpliendo sus funciones correctamente o porque la población percibe que están trabajando para favorecer a un sector concreto. Si no hay confianza, es casi seguro que los ciudadanos evitarán relacionarse con ellas en la medida de lo posible. Por lo tanto, si una democracia quiere promover la participación ciudadana, debe garantizar la credibilidad de sus instituciones" [58].

El sistema de gestión del flujo vehicular de la CDMX está integrado por diversas instancias gubernamentales y no gubernamentales, lo que demuestra su carácter recursivo; hay sinergia cuando es necesario interactuar en conjunto. Al integrarlo con los ciudadanos para que retroalimenten el sistema, se podrán considerar aquellas variables que interfieren en la fluidez del tráfico de manera cotidiana pero que pasan desapercibidas debido a otras variables más críticas, como se muestra en la Figura 10.

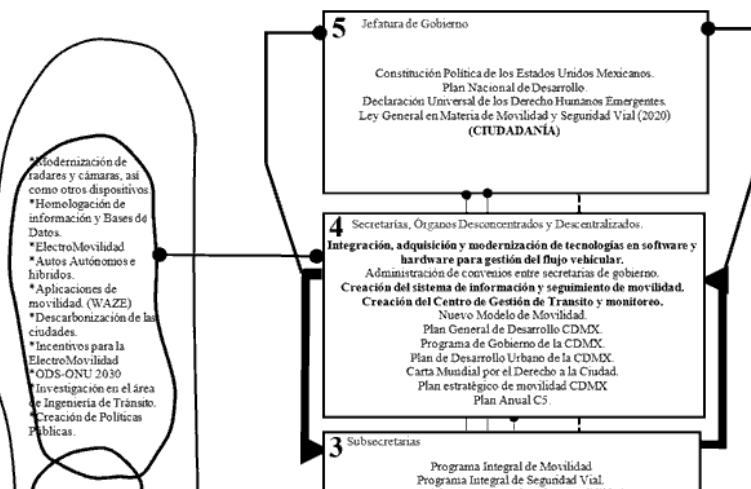


Fig. 10. Diagrama de la función de política o Sistema 5, elaboración propia basada en [48]

En la figura 11 se puede ver ya integrado todo el modelo de sistema viable aplicado a la gestión del flujo vehicular, los sistemas 1 representarían a las jefaturas de los departamentos de gobierno que son las unidades operativas que realizan el trabajo día a día, luego éstas a su vez coordinadas por el Sistema 2 son las direcciones generales a cargo de una o varias jefaturas, a través de políticas y decisiones administrativas por las que se rige. El Sistema 3 son a su vez las diferentes subsecretarías de gobierno que crea esa sinergia entre el S1 y S2 para que trabajen en armonía y comunicación. Y los sistemas 4 serían las secretarías de gobierno junto con los organismos desconcentrado y descentralizados, que son los encargados de ver hacia el futuro y el entorno para poder implementar cambios y reformas. Y por último como sistema 5 la Jefatura de gobierno y los ciudadanos, son los encargados que de alguna manera se logre que los sistemas 3 y 4 lleguen a un equilibrio tal que se coordinen mediante el intercambio de información y la aplicación de las normativas de las leyes correspondientes para poder logra los planes de desarrollo propuestos.

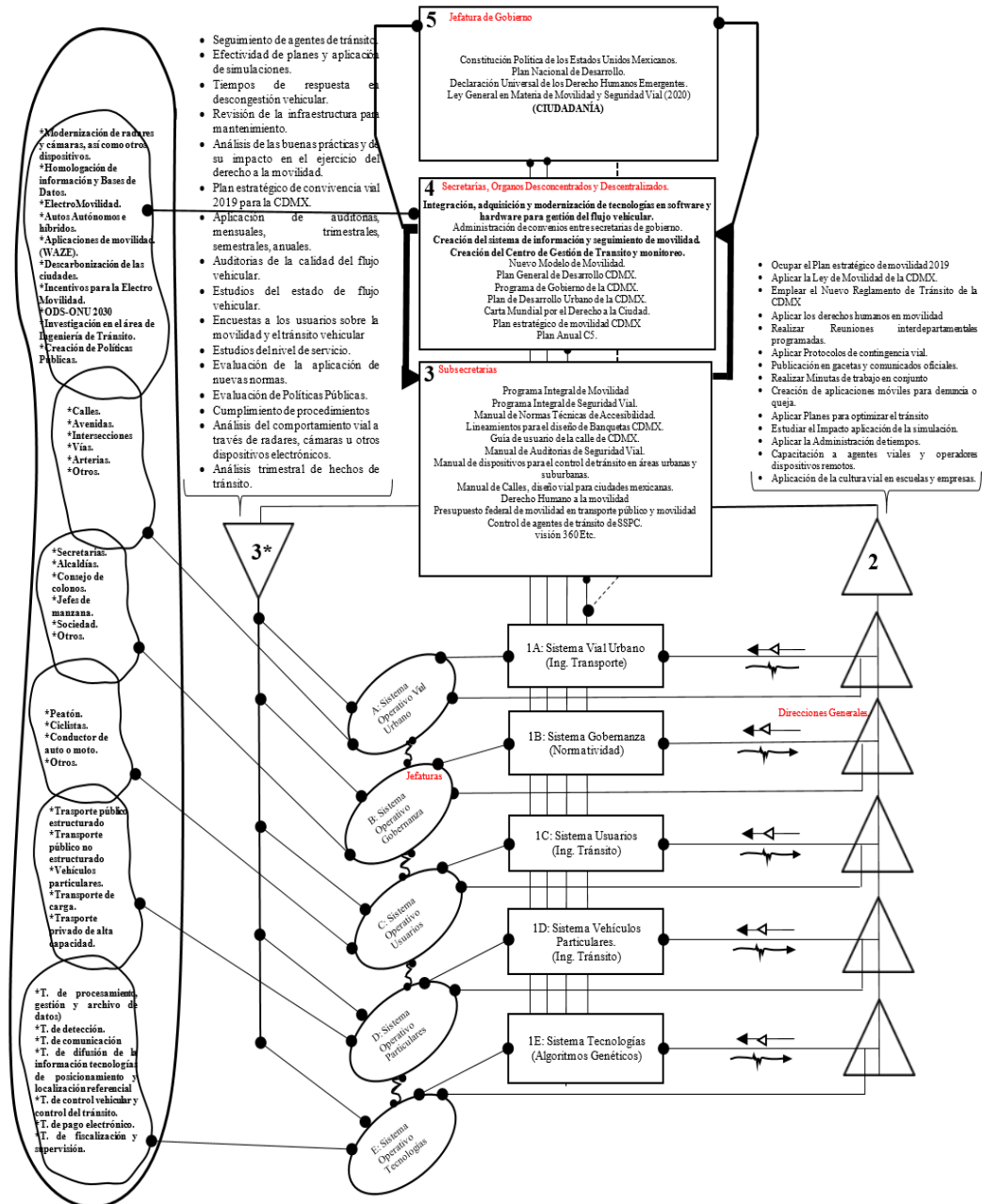


Fig. 11. Diagrama del Modelo de Sistemas Viales aplicado a la gestión del flujo vehicular (elaboración basada en [48]).

III. CONCLUSIONES

1. En este trabajo se identificaron muchos documentos e instituciones privadas y públicas que se ocupan de la congestión vial en la Ciudad de México. Cada uno de ellos ha creado análisis, manuales, encuestas, normas y políticas públicas y urbanas, entre otros [26,28,59-62]. Diferentes documentos se hicieron con el mero objetivo de entender y buscar alternativas de solución al congestionamiento vial; algunos siguen vigentes, a pesar de haber sido creados hace años, incluso décadas, pero ya no se ajustan a la realidad de esta compleja y cambiante ciudad. Al redactar este documento, nos encontramos con la pandemia COVID-19, que nunca imaginamos que tendría un impacto de gran alcance en la movilidad. Según la encuesta MOOVIT [63], la gente se vio obligada por la pandemia a utilizar autos privados para proteger su salud y evitar el contagio en el transporte público. Esto ya nos permite vislumbrar el futuro de la vuelta a las actividades en la nueva normalidad pospandémica, lo que probablemente conducirá a un aumento del tráfico de automóviles privados.
2. También comprobamos que existe una gran cantidad de datos relativos a normas, leyes y políticas públicas y urbanas en varios sitios web gubernamentales, pero intentar organizarlos para el modelo de sistema viable fue difícil. Esta gran cantidad, duplicación y dispersión de documentos y datos también la ha experimentado el urbanista Salvador Herrera, consultor de ONU-Hábitat [64]. El gobierno ha captado datos no estructurados de diversas redes sociales, como han visto la SEMOVI y la SSC. Muchos ciudadanos, en lugar de hacer una denuncia formal, prefieren hacer una queja a través de Twitter o Facebook, entre otros, por lo que estos datos carecen de estructura y de la formalidad de una denuncia. Sería ideal contar con una base de datos única [57] donde exista información estandarizada a pesar de que existan diferentes fuentes (públicas o privadas) con diversos objetivos.
3. La periurbanización ha ocurrido desde hace décadas en la CDMX, donde el uso del suelo y la habitabilidad han cambiado de rural a urbano debido al crecimiento y movilidad de la ciudad [65]. Actualmente, los ciudadanos buscan lugares cercanos para vivir y trasladar sus centros de trabajo a la ciudad, pero al no lograrlo, se desbordan hacia las zonas aledañas a la CDMX, asentándose en zonas agrícolas, bosques y pastizales, entre otros. Esto provoca un cambio en la vocación de las calles [32]; por ejemplo, donde antes pasaban caballos o camiones de carga, ahora, algunas personas buscan una salida para ir a trabajar, mientras que otras a pie buscan opciones de transporte o van en sus propios vehículos. Además, debido al alto costo de la vivienda en el centro de la CDMX, las zonas aledañas son más baratas. Esta situación ha provocado que varios pequeños empresarios generen innovación en el transporte, como bicitaxis o mototaxis, pero la mayoría opera de manera irregular. De acuerdo con la abogada Marta Lucía Gutiérrez, experta en políticas públicas de la red SIMUS ("Sistemas Integrados para la Movilidad Urbana Sustentable") [64], este tipo de transporte, junto con el automóvil particular, generalmente congestionan las calles secundarias y terciarias de algunas zonas.
4. Considerando todos los esfuerzos realizados en México para reducir la congestión vial, no sólo por el gobierno sino también por asociaciones civiles, organizaciones sin fines de lucro, etc., nos enteramos, por una entrevista personal con la ex Subsecretaria de Movilidad Laura Ballesteros después de participar en el evento INTERTRAFFIC 2019, que cada nueva administración, o cambio de gobierno, no ha continuado los esfuerzos de las administraciones anteriores. Otro factor es la falta de coordinación entre las autoridades, y la superposición de funciones que lleva a la falta de autoridad y la falta de confianza de los ciudadanos.
5. Si miramos esta situación con los ojos del modelo de sistemas viables, podemos ver que hay falta seguimiento, auditoría de las acciones realizadas. También existe un punto ciego al mirar hacia fuera y no considerar los problemas sociales que también afectan a la fluidez del tráfico, junto con la falta de mantenimiento que sufre la ciudad desde hace décadas, creando socavones, zanjas y baches, entre otros [66], y sin olvidar los badenes para evitar los accidentes de tráfico por atropellos y otros sucesos, pero que como segunda reacción traen consigo un entorpecimiento de la fluidez del tráfico, según la encuesta realizada en este trabajo.

6. Hay que tener en cuenta que hay personas que se ganan la vida realizando diversos servicios en calles o avenidas muy transitadas, lo que también repercute en su funcionalidad. A pesar de todo, se sigue utilizando el coche privado, ya que las políticas urbanas siguen apostando por la inversión en movilidad automovilística [7] y menos en los ciudadanos. Esta variable social no ha sido estudiada en profundidad, pero es algo con lo que conviven la mayoría de los habitantes de la ZMVM y, a pesar de la tecnología, se pasa por alto día a día. Así como todos los trabajadores informales de las calles o avenidas concurridas tienen derecho a ganarse la vida donde puedan, tanto los conductores como los automovilistas y los no automovilistas tienen derecho a acceder a las calles y avenidas.
7. Respecto a la encuesta se pudo ver que no todos los ciudadanos que manejan conocen el reglamento de tránsito y tienen la documentación correspondiente, así como la mayoría son adultos cada uno dedicado a diferentes actividades. La mayoría de los entrevistados se trasladan al trabajo o a la escuela. Respecto a los baches, agujeros y zanjas la mayoría de los entrevistados están de acuerdo que aumentan la congestión vehicular y sobre los topes o resaltos que tienen como objetivo salvar vidas la mayoría piensa que también causan congestión y creen que están colocados de manera improvisada. Así como muchos han tenido algún daño en su auto. También se pudo vislumbrar que la mayoría de los entrevistados no tenían conocimiento que hay lugares para denunciar, por la edad de la mayoría de los entrevistados están acostumbrados a usar aplicaciones para revisar el estado del tránsito vial antes de pasar por ahí.
8. Otro factor del que se habla entre los usuarios de transporte público concesionado como los llamados microbuses, autobuses, y las viejas combis llamadas peseras entre otros no tienen la educación de pararse solo en los paraderos oficiales, sino que incluso paran varias veces en una sola cuadra, debido a que sus clientes no van a la parada oficial y los detienen donde sea que les marquen el alto.
9. Por último, no olvidemos el incremento de las motocicletas como opción de movilidad, pero que apenas respetan su normatividad, y la micromovilidad que parece ser muy prometedora pero aún no se cuenta con la infraestructura pues solo cuenta con las ciclovías y aún no se trabaja en una regularización en la CDMX [68].

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Estadísticas de vehículos de motor registrados en circulación. Síntesis metodológica*, INEGI: México, 2020. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825100964> (Accesed Mar. 17, 2022)
- [2] Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México, ITDP, “La importancia de reducción del uso del automóvil en México. Tendencias de motorización, del uso del automóvil y sus impactos,” Reporte ITDP México, 2012, available: <https://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf> (Accesed Mar. 17, 2022)
- [3] J. J. Gutiérrez Chaparro, “Planeación urbana en México: Un análisis crítico sobre su proceso de evolución”, *Urbano*, vol. 12, núm. 19, pp. 52-63, 2009, available <https://www.redalyc.org/pdf/198/19811644008.pdf>
- [4] Organización de las Naciones Unidas-Habitat. “Reporte Nacional de Movilidad Urbana en México 2014-2015.” ONU-Habitat: México, 2015. <https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/Reporte-Nacional-de-Movilidad-Urbana-en-Mexico-2014-2015.pdf> (Accesed Mar. 17, 2022)
- [5] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. “Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016. Contaminantes criterio, tóxicos y compuestos de efecto invernadero.” Dirección General de la Gestión de la Calidad de Aire, 2016. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-2016/mobile/> (Accesed Mar. 17, 2022)
- [6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Accidentes de Tránsito”, INEGI: México, 2022. https://www.inegi.org.mx/temas/accidentes/#Informacion_general (Accesed Mar. 17, 2022)
- [7] Instituto Mexicano para la Competitividad A. C., “1er Estudio Nacional del Costo de la Congestión: ¿Cuánto cuesta la congestión vehicular en México?”, IMCO y SINTRÁFICO, México, 2018. Available <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/09/%C2%BFCu%C3%A1nto-cuesta-la-congesti%C3%B3n-en-M%C3%A9xico.pdf> (Accesed Mar. 17 2022)
- [8] J. Márquez-Contró, “Estrés-Afrontamiento ante el tráfico vehicular en choferes de transporte público de la Ciudad de México” Tesis de Licenciatura en Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, 2004. Available <https://repositorio.unam.mx/contenidos/121971>
- [9] R. Cal, J. Cárdenas, *Ingeniería de Tránsito (Fundamentos y aplicaciones)*, AlfaOmega: México, 2018.

- [10] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. “Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 2018, Contaminantes criterio, tóxico y gases y compuestos de efecto invernadero,” SEDEMA: México, 2018. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-cdmx-2018/Inventario-de-emisiones-cdmx-2018.pdf> (Accesed Mar. 18, 2022)
- [11] L. Ballesteros, J. Padilla, D. Franco, *Políticas de movilidad sustentable en la CDMX. Hacia un nuevo modelo*. México, 2018.
- [12] Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal, *Gaceta Oficial del Distrito Federal No. 1965 Bis.*, Ciudad de México, 2014, http://cgsservicios.df.gob.mx/sicdf/formatos/Gaceta_1965Bis_15_10_2014.pdf (Accesed Mar. 18, 2022)
- [13] TomTom Traffic Index, “The Results Are In! Mexico City Takes Crown of ‘Most Traffic Congested City’ in World from Istanbul”, 2022, <https://corporate.tomtom.com/static-files/5289c5aa-310c-4965-a4c0-516760a8a6fd> (Accesed Mar. 18, 2022)
- [14] TomTom Traffic Index, “Mexico City Retains Crown of ‘Most Traffic Congested City’ in World”, 2022, <https://corporate.tomtom.com/static-files/7b98ada1-ec2c-4da0-8579-f83ac0f31d88> (Accesed Mar. 18, 2022).
- [15] TomTom Traffic Index, “Measuring Congestion Worldwide”, https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ (Accesed Mar. 18, 2022)
- [16] TomTom Traffic Index, “Record Mexico City Traffic 2018, 2019, 2020”, 2020, https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/mexico-city-traffic/ (Accesed Mar. 18, 2022)
- [17] TomTom-Traffic-Index, “Full Ranking”, 2022, https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/?country=CA,MX,US (Accesed Mar. 18, 2022)
- [18] Secretaría de Seguridad Ciudadana, Ciudad de México, “457: Ante la Contingencia Sanitaria, la Afluencia Vehicular Disminuyó más de 60 por Ciento en la Ciudad de México”, SSC-CDMX, 2022. <https://www.ssc.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/457-ante-la-contingencia-sanitaria-la-afluencia-vehicular-disminuyo-mas-de-60-por-ciento-en-la-ciudad-de-mexico> (Accesed Mar. 18, 2022).
- [19] Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, “Reporte Trimestral Hechos De Tránsito Octubre-diciembre 2020.” SEMOVI: México, 2022. https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/ReporteTrimestralHT_2020_04.pdf (Accesed Mar. 18, 2022).
- [20] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México.” INEGI: México, 2022, http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/pr_omo/resultados_eod_2017.pdf (Accesed Mar. 22, 2022)
- [21] Cámara de Diputados, LXII Legislatura. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, “Encuesta telefónica nacional: Movilidad urbana y medioambiente, 2017”, CESOP: México, 2017. <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/camara/Centros-de-Estudio/CESOP/Opinion-Publica/Encuestas/Encuesta-telefonica-nacional-Movilidad-urbana-y-medio-ambiente> (Accesed Mar. 22, 2022)
- [22] Cámara de Diputados, LXIII LEGISLATURA, CDMX Estudios Sociales y de Opinión Pública. “Horarios Escalonados en la CDMX: De la viabilidad a la necesidad - 2016.” CESOP: México, 2016. <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/camara/Centros-de-Estudio/CESOP/Opinion-Publica/Encuestas/Encuesta-telefonica-nacional-Movilidad-Urbana> (Accesed Mar. 22, 2022).
- [23] Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, “Supervisa Jefa De Gobierno Intersecciones Peatonales.” SEMOVI: México, 2022. <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/supervisa-jefa-de-gobierno-trabajos-en-intersecciones-peatonales> (Accesed Mar. 22, 2022).
- [24] L. Ballesteros, F. Dworak, *Caminando hacia el futuro. Experiencia de Movilidad en la Ciudad de México*. México: Proyecto M2050, 2015.
- [25] Honorable Congreso de la Unión, “Decreto por el que se declara reformadas diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de Movilidad y Seguridad Vial”, 2022. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5608174&fecha=18%2F12%2F2020 (Accesed Mar. 2022)
- [26] Órgano de Difusión del Gobierno del Distrito Federal, “Gaceta Oficial Distrito Federal No. 1965 Bis”, 2022 http://cgsservicios.df.gob.mx/sicdf/formatos/Gaceta_1965Bis_15_10_2014.pdf (Accesed Mar. 22, 2022).
- [27] Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México, “Gaceta Oficial de la Ciudad de México No. 59”, 2022. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b2b25413227f7bf1157bfa014610c390.pdf (Accesed Mar. 2022).
- [28] Secretaría de Movilidad, “Guía de Usuario de las Calles”, SEMOVI-Fundación MAPFRE: México, 2022. https://www.semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/GuiaDeUsuarioDeLaCalleCDMX_V1_estilo_091216.pdf (Accesed Mar. 22, 2022)
- [29] Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) y Banco Interamericano de Desarrollo (BID), “Manual de calles. Diseño vial para ciudades mexicanas”, Gobierno de la CDMX: México, 2022. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/manual-de-calles-diseno-vial-para-ciudades-mexicanas> (Accesed Mar 22, 2022).

- [30] Secretaría de Movilidad, “Evaluación del Programa Integral de Movilidad (PIM) 2013–2018”, Plaza pública: México, 2022. https://plazapublica.cdmx.gob.mx/uploads/decidim/attachment/file/62/Evaluacio%CC%81n_PIM_2013-2018.pdf (Accesed Mar. 22, 2022).
- [31] Secretaría de Movilidad, “Programa Integral de Movilidad (PIM) de la Ciudad de México 2020–2024, Diagnóstico Técnico.” Plaza pública: México, 2022. https://plazapublica.cdmx.gob.mx/uploads/decidim/attachment/file/303/Diagno%CC%81stico_te%CC%81nico_de_movilidad_PIM.pdf (Accesed Mar. 22, 2022).
- [32] Secretaría de Movilidad, “Plan Estratégico de Movilidad de la CDMX 2019”, SEMOVI: México, 2022. <https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/plan-estrategico-de-movilidad-2019.pdf> (Accesed Mar. 22, 2022).
- [33] Jefatura de Gobierno, “Reglamento de Tránsito de la Ciudad de México”, SEMOVI: México, 2022. <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/secretaria/marco-normativo/reglamento-de-transito-cdmx> (Mar. 22, 2022).
- [34] INTERTRAFFIC-2019, “Acelerando la transición de la movilidad”, México, 2022. <https://www.intertraffic.com/press-releases/inauguran-intertraffic-mexico-2019/> (Accesed Mar. 22, 2022).
- [35] Asociación Mexicana de Transporte y Movilidad, “11vo Congreso Internacional de Transporte: La innovación en la Movilidad Urbana”, AMTM: México, 2022. <https://amtm.org.mx/eventos-y-congresos/11-congreso-internacional-de-transporte/> (Accesed Mar. 22, 2022).
- [36] A. A. Arghand, M. Alborzi, A.R. Ghatari, “Banking System Modeling by Viable System Modeling (VSM).” *Systemic Practice and Action Research*, vol. 34, no. 3, pp. 269–290, Jun. 2020.
- [37] Z. Rezaee, A. Azar, A. Erz. M. Nayeri, “Application of Viable System Model in Diagnosis of Organizational Structure.” *Systemic Practice and Action Research*. 32: 273–295. 2019.
- [38] S. Hildbrand, S. Bodhanya, “Guidance on applying the viable system model”, *Kybernetes*, vol. 44, no. 2, pp. 186–201, 2015.
- [39] A. Arghand, M. Alborzi, A. Ghatari, “A Methodology for IT Governance by Viable System Modeling (VSM): an Action Research in Designing a Data Center.” *Syst Pract Action Res*, no. 35, pp. 131–152, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11213-021-09559-8>
- [40] B. Trueba-Ríos, et. al. “Diagnóstico del sistema financiero, la banca comercial y el sistema de portafolios basado en el modelo de sistemas viables”, *Científica*, vol.16, núm. 2, pp. 55–65, 2012.
- [41] S. Samal, et al. “Analysis of Traffic Congestion Impacts of Urban Road Network under Indian Condition”. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1006, Sustainable Construction Technologies & Advancements in Civil Engineering (ScTACE-2020) 9–10 Octubre, 2020, Bhimavaram, India.
- [42] R. Torre, C. Corlu, J. Faulin, B. Onggo, A. Juan, “Simulation, Optimization, and Machine Learning in Sustainable Transportation Systems: Models and Applications.” *Sustainability*, no. 13, p. 1551, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13031551>
- [43] S. Xu, S. Li, R. Wen, “Sensing and detecting traffic events using geosocial media data: A review”, *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 72, 2018, pp. 146–160. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.06.006>.
- [44] Wei Chen, Fangzhou Guo, and Fei-Yue Wang, “A Survey of Traffic Data Visualization”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16, no. 6, 2015.
- [45] G. M. Hernández Ahumada, et. al. “Enfoque cibernético para una circulación vehicular inteligente” *Conference: XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*. Feb., 2020.
- [46] J. P. Ríos, “Aplicación de la cibernética organizacional al estudio de la viabilidad de las organizaciones patologías organizativas frecuentes (parte 1a),” *Revista DYNA*, vol. 83, no.5, pp. 265–281, 2008.
- [47] J. P. Ríos, *Diseño y Diagnóstico de Organizaciones Viables: Un Enfoque Sistémico*, Valladolid, España: Iberfora, 2008.
- [48] S. Beer, *Diagnosig the System for Organization*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 1985.
- [49] Asociación Mundial de la Carretera. “Manual Explotación de la red vial y sistemas inteligentes de transporte.” PIARC, 2022. <https://rno-its.piarc.org/es/conceptos-basicos-rno/que-significa-rno> (Accesed Apr. 08, 2022).
- [50] Fundación Carlos Slim. “Curso Movilidad Motorizada.” Capacítate para el empleo, 2022. <https://capacitateparaempleo.org/pages.php?r=.tema&tagID=4673> (Accesed Apr. 08, 2022).
- [51] Fundación Carlos Slim. “Curso Movilidad No Motorizada.” Capacítate para el empleo, 2022. <https://capacitateparaempleo.org/pages.php?r=.tema&tagID=4674> (Accesed Apr. 08, 2022).
- [52] Secretaría de Seguridad Ciudadana de la CDMX. “1344 SSP-CDMX se Apoya en Nuevas Tecnologías para Garantizar Movilidad y Brindar Seguridad Vial.” SSC-CDMX, 2022. <https://www.ssc.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/1344-ssp-cdmx-se-apoya-en-nuevas-tecnologias-para-garantizar-movilidad-y-brindar-seguridad-vial> (Accesed Apr. 08, 2022).
- [53] Secretaría de Seguridad Ciudadana de la CDMX. “Informe Anual de Actividades 2017.” SSC-CDMX, 2017. http://www.ssp.df.gob.mx/TransparenciaSSP/sitio_sspdf/LTAPRCCDMX/art_121/fraccion_XXXI/VINCULOS/INFORMEDEACTIVIDADES2017.pdf (Accesed Feb. 28, 2017)

- [54] Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX. “INFOVIAL.” Portal de datos abiertos de la CDMX, 2022. https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/d7d82ecf-1a5a-41eb-855e-a3fd39a942b6/resource/6a731080-1055-4fbd-b721-2e66e98d6b31/download/infovial-semovi_ver03-corregida-1.pdf (Accesed Apr. 11, 2022)
- [55] Secretaría de Seguridad Ciudadana de la CDMX. “Tarjeta Informativa: A Partir de este martes, la SSC Implementará un Carril Reversible en Circuito Interior, de Norte a Sur.” SSC-CDMX, 2020. <https://www.ssc.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/ti-partir-de-este-martes-la-ssc-implementara-un-carril-reversible-en-circuito-interior-de-norte-sur> (Accesed Mar. 16, 2020).
- [56] J. Romero, “Dinámica del Cambio Organizacional del Ministerio de Defensa de Colombia Desde la Perspectiva de la Ciencia Política y la Teoría Organizacional (1990–2002),” *ResearchGate*, 2009. https://www.researchgate.net/publication/318323060_Dinamica_del_cambio_organizacional_del_Ministerio_de_Defensa_de_Colombia_desde_la_perspectiva_de_la_ciencia_politica_y_la_teoria_organizacional_1990_-_2002
- [57] Secretaría de Seguridad Ciudadana de la CDMX. “¿Por qué es necesaria una base de datos única de hechos de tránsito?”, SEMOVI, 2022. <https://www.semovi.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/por-que-es-necesaria-base-de-datos-unica-hechos-de-transito> (Accesed Apr. 11, 2022).
- [58] A. Serrano Rodríguez, “La participación ciudadana en México. Estudios Políticos 2015,” *Scientific Electronic Library Online*, no. 34, pp. 93–116, 2015. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-16162015000100005&script=sci_abstract&tlng=es (Accesed Apr. 11, 2022).
- [59] Gobierno de la Ciudad de México. “Gaceta Oficial De La CDMX No 59.” https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetitas/53a3b010ce67ef9f998f25916e9dd66b.pdf (Accesed Apr. 11, 2022).
- [60] Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. “Gaceta Oficial De La CDMX No. 136.” Consejería jurídica y de servicios legales, 2022. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetitas/0c37b1746512f388bf98ff67e80bcd33.pdf (Accesed Apr. 11, 2022).
- [61] Órgano del Gobierno del Distrito Federal. “Gaceta Oficial Del Distrito Federal No.146 Tomo 1.” Consejería jurídica y de servicios legales, 2022. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetitas/4f0e3c75c60c8.pdf (Accesed Apr. 11, 2022)
- [62] Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. “Anatomía de la movilidad en México. Hacia dónde vamos.” Gobierno de México, 2022. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/anatomia-de-la-movilidad-en-mexico-hacia-donde-vamos?idiom=es> (Accesed Apr. 11, 2022).
- [63] MOOVIT. “Impacto de la COVID-19 en el Uso del Transporte Público.” https://moovitapp.com/insights/es/Moovit_Insights_%C3%8Dndice_de_Transporte_P%C3%BAblico-countries?__hstc=171844735.525c6349dea4394fa98ed2e7d8fb0066.1620193440431.1620193440431.1620193440431.1&__hssc=171844735.4.1620193440431&__hsfp=3487247654 (Accesed Apr. 11, 2022).
- [64] Asociación Mexicana de Transporte y Movilidad. Webinar AMTM: “Desarrollo Local, Crecimiento Metropolitano y Movilidad.” Canal de youtube AMTM. <https://www.youtube.com/watch?v=-J2z6TquDD0&list=PL2Z14ARHSCfLCxxs1-9g5Xsahle5vzFFF> (Accesed Apr. 11, 2022).
- [65] Ávila Sánchez Héctor. “Periurbanización y espacios rurales en la periferia de las ciudades, Ciudad de México, 2009.” *Revista Estudios Agrarios* no. 41, pp. 93-123, Jun., 2009. Available <http://www.pa.gob.mx/publica/PA074101.html>
- [66] Secretaría de Movilidad. “Segundo Informe Anual agosto 2019 - Julio 2020.” SEMOVI. <https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/2do%20Informe%20anual.pdf> (Accesed Apr. 11, 2022)
- [67] M. Jackson, *Systems Thinking: Creative Holism for MANAGER*, Hoboken, NJ, USA, Wiley. 2003.
- [68] M. Cadengo, A. Mendoza, “Micromovilidad, una alternativa de transporte.” NOTAS número 187, septiembre – octubre 2020, Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=516&IdBoletin=187> (Accesed Apr. 11, 2022)

Propuesta sistémica para mejorar la red mexicana de transporte aéreo de carga

Systemic Proposal for Improving the Mexican Air Cargo Transport Network

José Luis Rodarte-Conde¹, Jorge Rojas-Ramírez², Flavio Arturo Domínguez-Pacheco³,
Rosalba Zepeda-Bautista⁴

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹<https://orcid.org/0000-0003-3017-6675> | josel_rodarte_conde@hotmail.com

²<https://orcid.org/0000-0002-0779-1242> | jrojasr@ipn.mx

³<https://orcid.org/0000-0003-3561-7257> | fdominguezp@ipn.mx

⁴<https://orcid.org/0000-0003-0988-8619> | rzepedab@ipn.mx

Recibido 07-12-2022, aceptado 08-02-2023.

Resumen

El continuo avance tecnológico en las comunicaciones y los transportes demanda la actualización de la infraestructura existente de una red de transporte aéreo de carga, aplicando una toma de decisiones de base formal, con el fin de mostrar un desempeño elevado. Particularmente en México, esta decisión es necesaria dadas las oportunidades de nuevas sedes aeroportuarias y las necesidades de atender mayores volúmenes de carga. En este sentido, después de analizar las características de la red de transporte aéreo actual en este país, se consideran las ventajas del análisis de redes sociales en cuanto a la entrega de parámetros de centralidad, de intermediación, de densidad o de integración, entre otros, lo que le proporciona un sustento sistémico, necesario para alcanzar la mejoría buscada. A partir de simular y evaluar el sistema actual en sus parámetros significativos, de acuerdo con la estadística operacional origen-destino del servicio regular nacional, se muestra una fuerte centralización de la Ciudad de México. Se ilustra la aportación de la metodología de las redes sociales a través de comparar con una red alterna factible, que incorpora a dos aeropuertos más como distribuidores centrales, los de San Luis Potosí y de Querétaro. La simulación del caso propuesto permite la observación para evaluar los nuevos valores de los parámetros de la red y, de este modo, facilita los análisis que se requieran para sustentar las futuras decisiones, como sería la situación de la disponibilidad de una nueva estructura aeroportuaria para carga y sus flujos asociados.

Palabras clave: aeropuertos, enfoque de sistemas, redes de transporte aéreo de carga, redes sociales, simulación.

Abstract

The impressive technological advance in communications and transports demands updating the existing infrastructure of an air cargo transport network, adopting a formal decision-making process, in order to show a high performance, particularly in Mexico. This decision is necessary given the opportunities for new airport sites and the need to serve higher cargo volumes. In this sense, after analyzing the characteristics of the current air transport network in this country, the advantages of social network analysis are considered in terms of the delivery of centrality, intermediation, density or integration parameters, mainly, which provides a systemic support, necessary to achieve the desired improvement. Starting from simulating and evaluating the current system in its significant parameters, according to the operational statistics origin-destination of the national regular service, a strong centralization in Mexico City is shown. The contribution of the social networks methodology is illustrated comparing with a feasible alternative network, which incorporates two more airports as central hubs, those of San Luis Potosí and Querétaro. The simulation of the proposed case allows the visualization to evaluate the new values of the network parameters and, in this way, facilitates the required analysis to support future decisions, such as the situation of the availability of a new cargo airport structure and its associated flows.

Index terms: airports, airfreight transport networks, simulation, social networks, systems approach.

I. INTRODUCCIÓN

El manejo de mercancías entre el punto en que se originan y los puntos de su distribución, que tiene como finalidad llevar los productos a su destino final, es una parte importante de las economías. Conocidos los medios de transporte como el terrestre, el marítimo o el aéreo, se aprecia que se utilizan en proporciones distintas, obedeciendo a una diversidad de factores, entre los que se destacan los de distancia y de costo.

Lo anterior guarda también dependencia de los avances tecnológicos y de la infraestructura instalada en un entorno geográfico determinado. En los países de mayor nivel de desarrollo se recurre al transporte aéreo en mayor medida que en lugares con economías más restringidas.

Considerando el caso de los flujos internos de transporte de carga en México, la preferencia por los transportes carreteros supera en gran medida al del transporte aéreo. Es también muy notoria la centralización de los flujos de carga a través del aeropuerto de la capital y cabe plantearse si existen mejores alternativas.

Para la toma de decisiones que pretende elevar el desempeño del transporte aéreo es necesario aplicar un enfoque sistémico, abarcando los factores diversos, mediante la comparación de alternativas, para optar por aquella que muestre ser la más benéfica. Esta comparación recurre al empleo de modelos del comportamiento de la red de transporte, que incluya a las ciudades más distintivas en la distribución de los flujos. Se elige para ello el análisis de redes sociales que, con bases cuantitativas, representa diferentes estructuras con los actores de la red, conformando las alternativas más viables y permite realizar corridas de los flujos en cada caso, mediante un paquete computacional.

La experimentación con estos modelos conduce a resultados que, por la comparación de un conjunto de parámetros de desempeño, presentan un sustento formal a los tomadores de decisiones sobre las políticas de estructuración de la red de transporte aéreo. Con este objetivo, se realiza en este documento la ejemplificación del caso de decisión sobre la red aeroportuaria de México, considerando una mayor participación relativa de las ciudades cercanas.

II. MARCO CONTEXTUAL

El transporte aéreo es una actividad económica de altos beneficios para todos los participantes. El crecimiento promedio global del tráfico en el periodo de 2016 a 2019, periodo anterior a la pandemia por COVID-19, fue del 6.23% y alcanzó la cifra de 3700 millones de pasajeros transportados. Las aerolíneas a nivel mundial crecieron 8.8% y las dieciocho líneas principales reportaron ganancias por mil millones de dólares. [1], [2], [3], [4]. En lo referente a la carga, en el año 2017 se transportaron alrededor de 63 millones de toneladas, lo que significa menos del uno por ciento del comercio mundial, pero con un valor de más del 35%. Esto es, ingresos por 59 mil millones de dólares.

En cuanto a México, el panorama es muy contrastante. Es desproporcionada la preferencia que, en términos de la asignación presupuestal oficial, se da al autotransporte terrestre, con una aprobación del gasto del 80% en 2013 [5], en tanto que al transporte aéreo se le otorgó el 4.6%. La prioridad se concede a proyectos carreteros en comparación con los otros modos de transporte [6].

En relación a los aeropuertos de la red nacional mexicana, cuatro manejan 85% de la carga y cuentan con infraestructura para atender el volumen potencial correspondiente [7]. En cambio, el resto presenta problemas de infraestructura subutilizada [8]. En las terminales de carga aérea internacional, la autoridad aduanera realiza largos procesos de revisión y autorización, ocasionando que se encarezcan las operaciones. Las quejas son frecuentes porque no existe una conexión directa y eficiente con el modo carretero. Estas deficiencias se ven

traducidas en el desempeño logístico del país, que lo colocan en la posición 54 a nivel mundial [9], con las desventajas que eso conlleva.

La toma de decisiones llevada a cabo en el país en las últimas décadas ha sido centralista, destacando a la capital del país. Incluso el planeado aeropuerto Felipe Ángeles, en el Estado de México, sigue este enfoque. Al ser el aeropuerto Benito Juárez de la Ciudad de México el principal actor de la red, se restringe el desarrollo del resto de los aeropuertos. El aeropuerto capitalino trabaja actualmente como centro de operaciones (en este dominio denominado *hub*), con demoras, congestiónamiento y saturación.

8

En el periodo de 2009 a 2017, el volumen de carga en el aeropuerto capitalino aumentó a una tasa media anual del 6.6%, con tendencia a la saturación. La Fig. 1 muestra los pronósticos de carga con tendencia al alza [10].

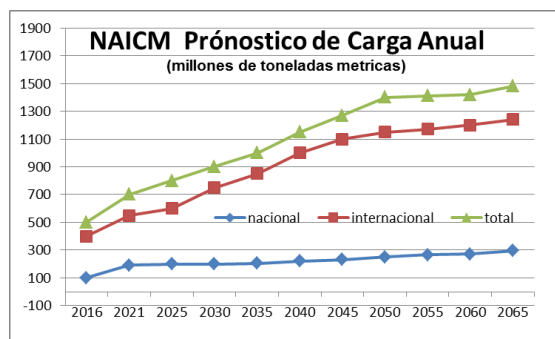


Fig. 1. Pronóstico de carga aérea para el aeropuerto de la Ciudad de México [10].

Ante esta complicada situación, se propone modificar para mejorar la red de carga a través del cambio de rutas, para permitir que la red sea menos dependiente de un aeropuerto y crezca la participación de los demás. Para apoyar esta propuesta se considera el análisis de redes sociales, que evalúa y justifica cuantitativamente. Los indicadores de evaluación que contempla el análisis de redes sociales resultan ser novedosos, al igual que interesantes, pues su perspectiva es de red, especialmente en los sistemas sociales. Es decir, su análisis se enfoca a toda la red, como los indicadores de densidad y centralización. Otros en cambio se hacen a nivel nodos. Además, se comprueba que funciona como conocimiento teórico académico, pero guardando consistencia con la realidad.

Para interconectar los nodos de una red aparecen dos situaciones extremas, que son la conexión directa de cada uno a todos los demás o la asignación de un solo nodo central, a través del cual se interconecta cada par de nodos. Las dos tienen desventajas por el número de enlaces requeridos. El modelo de centro de operaciones, o *hub and spoke*, de asignación múltiple, combina las ventajas de ambos, con una distribución radial, en que los nodos de origen y destino se interconectan en nodos de recepción y redistribución de los flujos originarios de las terminales de la red. Los tres tipos de redes se ilustran en la Fig. 2 [11].

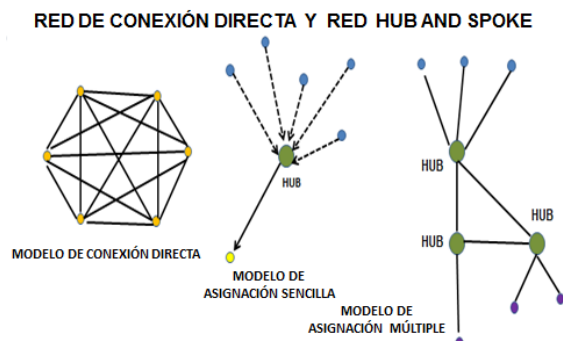


Fig. 2. Tipo de Redes, con conexión directa, asignación sencilla y asignación múltiple *hub and spoke* [11].

Dentro del análisis de redes se encuentran diversos enfoques. En el caso de Magilhetti [12], se observa que las redes de los operadores integradores (caso de empresas como FedEx, UPS o DHL) basan su estructura de red en la modalidad *hub and spoke*. La combinación de flujos de carga a través de los hubs genera economías de escala. Zhou, *et al.* [13] muestran que una red de transporte aéreo debe estudiarse con respecto a la ponderación de la conexión entre dos aeropuertos, es decir, el número de rutas, la frecuencia de los vuelos, el número de asientos de pasajeros, o la carga. Se debe considerar también que, en lugar de enfocarse exclusivamente en las conexiones que posee una red, se evalúe la capacidad total de carga que las conexiones poseen [14].

Otra de las métricas usadas para entender el rendimiento de una red de la carga aérea es la *conectividad*. Los países con alto número de conexiones aéreas aparecen sólidamente asociados con una integración más profunda en la economía de comercio mundial [15]. La conectividad se mide por el número de conexiones directas e indirectas a otros aeropuertos y por la calidad de estas conexiones en términos de tiempo y costo. La conectividad del aeropuerto está más centrada en la capacidad que se puede proporcionar desde un aeropuerto a otros aeropuertos [16].

También es conveniente reconocer la medida de la importancia y la fuerza de cada aeropuerto, es decir, si está conectado a nivel mundial o regional. Del mismo modo, se debe definir el número de nodos secundarios (los nodos vecinos) y la ponderación asociada a la red [17].

Una métrica más es la capacidad del aeropuerto, es decir, la cantidad de aeronaves que puede contener durante la operacional normal. Un aumento en la demanda de viajes provoca mayores retrasos. Por tal motivo, los proveedores de servicios de navegación aérea deben comprender la capacidad operativa y los riesgos asociados [18]. En cuanto a su estructura dinámica, por los tiempos de salida y llegada, se generan cuellos de botella, que varían considerablemente dentro de un día y durante la semana [17].

Para China y Estados Unidos, que mueven una enorme cantidad de productos alrededor del mundo, resulta interesante conocer cómo operan sus redes aéreas, ya que cada país desarrolla un sistema diferente. El caso chino se caracteriza por rutas rápidas, mientras que el de los EE. UU. ha desarrollado un sistema más coordinado [19]. En China la disponibilidad de vuelos comerciales es mucho más restringida que en los EE. UU. La red en China tiene una estructura fija, mientras que en los EE. UU. es más flexible y con una dinámica compleja. El país asiático enfrenta una mayor posibilidad de rutas congestionadas en comparación con su contraparte. La red estadounidense es adaptable dependiendo de factores como el clima, el tráfico, la demanda y la asignación de capacidad. En cambio, en China el espacio aéreo para vuelos comerciales es más restringido, con una estructura de red menos conectada y menos robusta, lo que genera una capacidad operativa menor que la de los EE. UU.

Desde el punto de vista de los proveedores de servicios, la red de EE. UU. es más poderosa puesto que la conectividad es más grande y la falla de la tasa de enlaces es menor porque se tienen más opciones de rutas aéreas al cruzar el espacio aéreo [20].

Una reseña de métodos comparables usualmente utilizados en la resolución de casos como el presente, remite a trabajos en que se aplican técnicas de flujo en redes, de simulación Montecarlo o métodos resilientes. En el primer caso, para el diseño de la red aeroportuaria de Indonesia [21], es considerada la técnica de redes, mediante el árbol de amplitud mínima, que evalúa distancias, costos y frecuencias de los vuelos. Por su parte, tiene aplicación en este medio la teoría de líneas de espera, en su vertiente de simulación Montecarlo de números aleatorios, que es aplicada a casos como el de desempeño sustentable en la operación [22].

Particularmente para los recientes años de afectación a las redes de aeropuertos debida a la pandemia por COVID-19 ha aparecido la necesidad de evaluar el aspecto de su resiliencia, es decir, su capacidad de modificar sus características de operación para mitigar la caída en el número y las restricciones, con propuestas de métodos de análisis para desempeños robustos [23]. Para el mismo escenario de riesgo sanitario, al emplear métricas del desempeño de diferentes topologías de redes de aeropuertos, por sus intercambios modificados de flujos debidos a las restricciones impuestas, se ha analizado el efecto que originan diferentes diseños de las redes [24].

Después de la aportación hecha por el análisis de redes sociales ante la propuesta sugerida, se usa una herramienta cuantitativa que permite medir las alternativas y apreciar su punto de vista a través de sus indicadores respectivos. La simulación de los aeropuertos principales de carga se efectúa a través de modelos matemáticos de líneas de espera. El Instituto Mexicano de Transporte en 2001 [25] considera que al aeropuerto de la Ciudad de México se le puede representar a través de un modelo de una línea de espera abstracta y una pista como servidor. Por lo tanto, se aplica el mismo criterio para simular los principales aeropuertos de carga del país. En lo sucesivo se designará, por brevedad, como aeropuerto de México al aeropuerto de la Ciudad de México.

III. METODOLOGÍA SISTÉMICA CON REDES SOCIALES

Para esta investigación sobre el caso mexicano se considera el análisis de redes sociales. Las redes sociales estudian este tema con una visión novedosa, además de que considera aspectos cuantitativos. Este análisis ayuda a clarificar y profundizar una situación que otros análisis no consideran.

En el proceso de análisis de redes sociales se incluyen seis principales fases: la identificación de datos, la recolección de datos, la limpieza de datos, el análisis de datos, la visualización de resultados y la interpretación de los resultados.

La necesidad de agilizar los cálculos y el diseño de algoritmos que permitan visualizar una red social han motivado investigaciones sobre cómo representar la información mediante el uso de sistemas informáticos. En el caso del análisis de redes sociales existe software como UCINET, NetDraw, Multinet, Cytoscape o Pajek, que permiten experimentar con redes sociales de manera gráfica y realizar cálculos sobre los datos [26]. La selección de UCINET para este trabajo, además de ser compatible con el ambiente Windows, se debió a la facilidad de generar indicadores, identificar actores clave y permitir visualizar las redes sociales estudiadas.

A. Análisis de Datos de Redes Sociales

Los datos utilizados se obtuvieron de la estadística operacional origen destino del servicio regular nacional de 2019, con respecto al rubro de carga [27]. Con estos datos se crea una tabla en Excel considerando el flujo de carga que ocurre entre el aeropuerto origen y el aeropuerto destino, que después se exporta al software UCINET 6 [28]. Los datos de la red son analizados a través de UCINET 6 y el producto obtenido del análisis

de la situación actual de la red mexicana de carga aérea se comenta a través de los indicadores principales de redes sociales [29].

Los principales indicadores que las redes sociales que se estudian son: *centralidad de grado* [30], *grado de intermediación* [31], [32], *densidad* [33], *centralización* [30], *cercanía* [30], *integración* [34] y *radialidad* [33]. La estructura de la red y la identificación de los actores clave son los temas primordiales encontrados en este análisis.

6

B. Estructura de la Red

La estructura de la red es considerada en los tres aspectos que se enlistan.

1. El territorio nacional cuenta con 11 aeropuertos con la suficiente importancia para participar en actividades de carga aérea. De las 32 entidades federativas en el país, únicamente 34% participa, de donde se entiende que el tamaño de la red es bajo para estos fines. Al ampliar la consideración al caso del comercio exterior, por los acuerdos comerciales internacionales firmados [35], es también importante incluir las oportunidades de conexión eficiente con el resto del mundo.
2. Tomando en consideración el número de enlaces activos entre los enlaces posibles (83 de 110), se obtiene una densidad de la red del 75%. Este porcentaje reporta una cantidad aceptable. Sin embargo, los flujos mayores de carga son generados por dos o tres aeropuertos.
3. En cuanto a la reciprocidad entre el intercambio de mercancías entre aeropuertos, sólo las conexiones San Luis Potosí – México, Querétaro – Guadalajara y San Luis Potosí – Monterrey lo cumplen; los de mayores disparidades se dan entre México – Cancún, Guadalajara – México, México – Monterrey, Tijuana – México y Tijuana – Guadalajara. Lo anterior claramente indica que la red es de poca igualdad y cuya consecuencia resultante es la inestabilidad y el desequilibrio.

C. Identificación de Actores Clave en la Red

Los aeropuertos considerados como los actores clave de la red aérea de carga en el país se identifican de la siguiente manera:

1. El aeropuerto de México, es el que mejor se conecta directamente con el resto de la red y obtiene la mayor ventaja sobre el resto. Guadalajara es el siguiente (Grado de Centralidad).
2. Los aeropuertos puente, o sea los que son los capaces de interrumpir o controlar la operación, son el de México, el de Monterrey y el de Guadalajara (Grado de Intermediación).
3. Los aeropuertos de México, de Monterrey y de Tijuana logran ser los de mayor influencia sobre el resto de los aeropuertos, vía directa o indirectamente (Centralidad Beta)
4. Nuevamente el aeropuerto de México juega el papel principal en la red, ya que es el más conectado y el que ejerce pleno dominio sobre los demás (Centralización).
5. Los aeropuertos de Monterrey, de México y de Guadalajara son los de mayor facilidad de conectarse al resto de los nodos de la red, además de ser menos dependientes (Centralidad de Cercanía).
6. Los aeropuertos de México, de Monterrey, de Guadalajara, junto con el de Tijuana, son los que se pueden conectar directamente al resto de los aeropuertos (Integración). Por otra parte, la Radialidad se relaciona con los aeropuertos que se conectan a través de otros pocos, como ocurre con los aeropuertos de México, Monterrey, Guadalajara y Tijuana.

D. Análisis de la Red de Carga Aérea con Cambios de Rutas

Ante los hallazgos encontrados sobre la red de las principales rutas de carga del país se propone una primera solución que permita alcanzar una mejoría en forma rápida y sin grandes complicaciones. Esta primera idea gira principalmente sobre el aeropuerto de la capital del país, ya que es el principal eje del movimiento de carga, pero que sin embargo es el que no permite el desarrollo al resto de los aeropuertos.

IV. SIMULACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para la mejoría de la red aérea se propone modificarla reduciendo la participación del aeropuerto de México. Como opción de experimentación se considera la incorporación de los aeropuertos de Querétaro y San Luis Potosí, como nuevos hubs de la red, dada su ubicación geográfica, para conectar con las terminales cercanas, sin alejarse demasiado de la Ciudad de México. La Tabla I muestra la comparación de las alternativas con el cambio de las rutas asignadas.

TABLA I
COMPARACIÓN DE LAS DOS REDES CON LOS CAMBIOS DE RUTAS DE CARGA

Ruta actual	Ruta propuesta	Vuelos	Toneladas
Guadalajara – México	Guadalajara – Querétaro	7 000	7 000
Mérida – México	Mérida – Querétaro	3 500	1 800
Monterrey – México	Monterrey – Querétaro	600	1 200
San Luis Potosí – México	San Luis Potosí – Querétaro	1 400	1 500
Tijuana – México	Tijuana – Querétaro	3 500	2 800
Total		16 000	14 300

Fuente: elaboración propia adaptada de [27].

La carga total mencionada representa el 46% de la carga total que mueve actualmente el aeropuerto de México y el 23% de sus vuelos. Nuevamente se aplicó el software UCINET 6 para Windows y el producto obtenido para esta nueva asignación se resume en la Tabla II.

La Fig. 3 muestra la red obtenida al llevar UCINET 6 la información al software de visualización de redes NetDraw 2.177. Los flujos de carga aérea que ocurren entre los aeropuertos son representados mediante flechas y el espesor depende de la cantidad enviada.

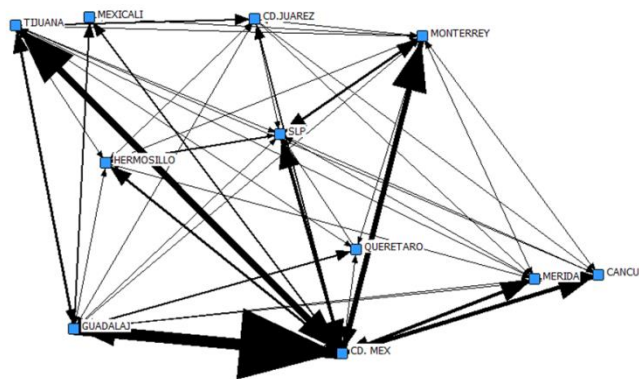


Fig. 3. Red de transporte de carga aérea inicial en 2019.

TABLA II
INDICADORES DEL ANÁLISIS DE REDES SOCIALES APLICADO A LA RED MEXICANA DE CARGA AÉREA ANTE EL CAMBIO

Indicador del análisis de redes sociales	Valor para la red original	Valor para la red con el cambio
Grado de Centralidad	De salida 0.2015 y entrada 0.1792 en la red	De salida 0.3431 y entrada 0.1159 en la red
Grado de Intermediación	Centralización de la red 6.04	Centralización de la red 5.34
Densidad	0.755	0.773
Centralización	De entrada 20.15; de salida 17.92	De entrada 11.59; de salida 34.3
Centralidad de Cercanía	De entrada 39.74; de salida 40.46; Monterrey, México y Guadalajara 100; Tijuana 90; San Luis Potosí 90; Querétaro 62	De entrada 37.86; de salida 37.51; Monterrey, México, Guadalajara 100; Tijuana 90; San Luis Potosí 90; Querétaro 71
Integración	Integración de entrada y salida es el mismo, 13.50 en la red; San Luis Potosí 95; Tijuana 95; Querétaro 70	Integración de entrada y salida de 12.50 de la red; San Luis Potosí 95; Tijuana 95; Querétaro 80
Radialidad	México, Monterrey y Guadalajara, 100; Tijuana 95	Mismos valores
Centralidad Beta	México 2.181; Guadalajara 0.925; Monterrey 1.208; Querétaro 0.093; San Luis Potosí 0.793; Tijuana 1.417	México 1.563; Guadalajara 1.043; Monterrey 1.252; Querétaro 1.208; San Luis Potosí 1.166; Tijuana 1.378

Fuente: elaboración propia con datos de [27].

V. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Por cada uno de los indicadores comprendidos en el análisis de redes sociales, se llevan a cabo las consideraciones siguientes:

1. Grado de Centralidad. Los valores que más crecieron fueron los de salida, por lo que los aeropuertos pasaron de un lugar a otro: Monterrey (0.069 a 0.117), Querétaro (0.009 a 0.154), San Luis Potosí (0.045 a 0.110) y Tijuana (0.074 a 0.126). También Tijuana creció en su valor de entrada (0.06 a 0.104). Esto significa que el número de vínculos de estos aeropuertos a otros aumentó. Por otra parte, el aeropuerto de México representa el mejor conectado de la red de carga.
2. Grado de Intermediación. Monterrey, México, Guadalajara Tijuana y San Luis Potosí fueron los de mayor cambio de valor. Entonces el índice de la red disminuyó, lo que significa que el control o interrupción del flujo de carga ya no estará reducido a unos pocos aeropuertos.
3. Densidad. El valor de la conectividad y el número de vínculos existentes aumentó en la red debido al cambio de rutas.
4. Centralización. El aeropuerto de México sigue siendo el actor dominante de la red. Sin embargo, con la inclusión de San Luis Potosí y Querétaro se le quita participación. Querétaro fue el que más creció en este apartado, al pasar de 62 a 71 en la cercanía de entrada.
5. Centralidad de Cercanía. Los aeropuertos con mayor facilidad de alcanzar al resto de los aeropuertos son nuevamente Monterrey, México y Guadalajara. Querétaro logró incrementar su valor en este rubro.

6. Integración. Los tres principales aeropuertos son los mejor conectados a los diversos aeropuertos de la red. Querétaro aumentó su conectividad pasando de 70 a 80.
7. Radialidad. El cambio prácticamente fue nulo en los aeropuertos de San Luis Potosí, Querétaro y Tijuana.
8. Centralidad Beta. Este indicador muestra que al aeropuerto de México se le resta influencia sobre los demás y, por consecuencia, el resto de aeropuertos ahora poseen mayor influencia en la red.

9

La Fig. 4 muestra la red obtenida al momento en que UCINET 6 lleva la información a NetDraw 2.177 (Network Visualization Software). Los flujos de carga aérea que ocurren entre los aeropuertos son representados mediante flechas y el espesor depende de la cantidad enviada. Se observa que el flujo entre Guadalajara y México disminuye notablemente, Querétaro tiene mayor presencia y San Luis Potosí genera tres rutas destacadas.

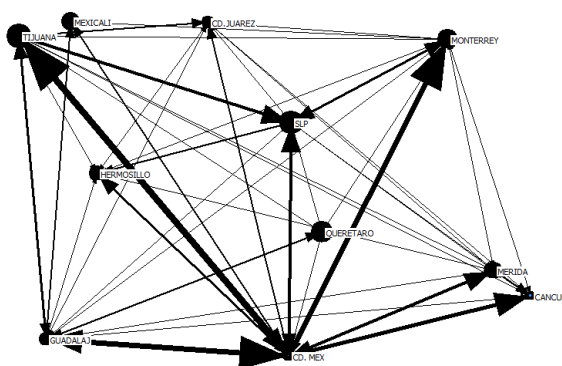


Fig. 4. Red de transporte de carga aérea modificada.

De lo anterior se puede observar que la propuesta formulada conlleva avances interesantes. Esto se refleja en los indicadores de Grado de Centralidad (el número de vínculos crece), el Grado de Intermediación (el control o interrupción del flujo de carga ya no se reduce a un solo aeropuerto), Densidad (con un aumento y la conectividad crece en toda la red), Centralización (al aeropuerto de la capital se resta protagonismo, logro muy importante, con crecimiento significativo para Querétaro) y Centralidad de Cercanía (la facilidad de alcanzar más aeropuertos aumenta especialmente para Querétaro).

E. Simulación matemática en los cambios de rutas

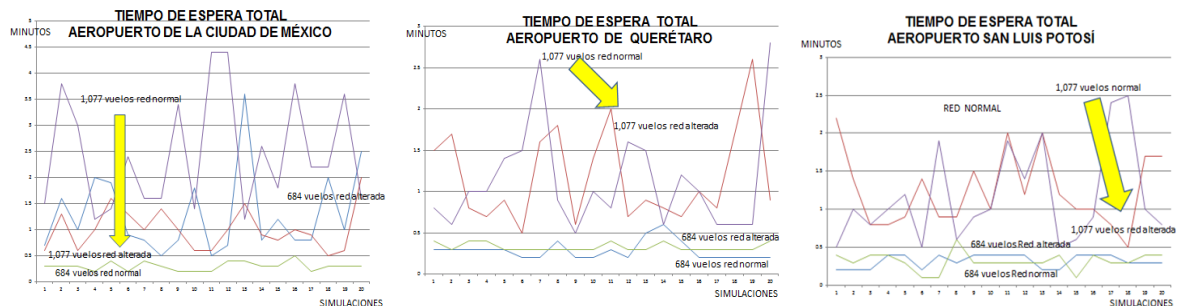
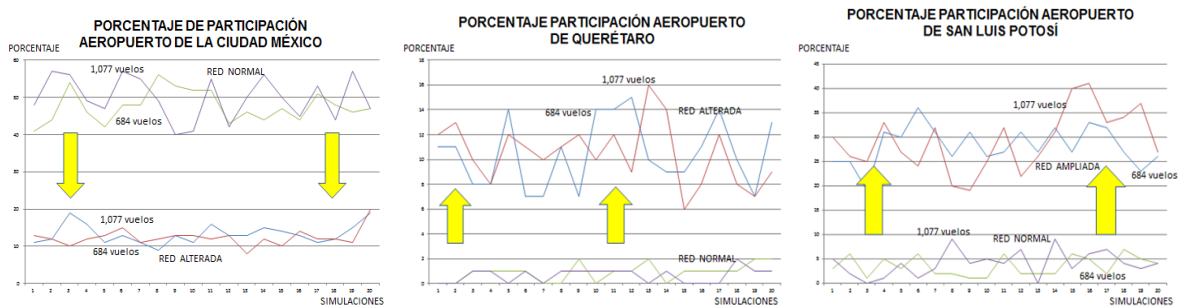
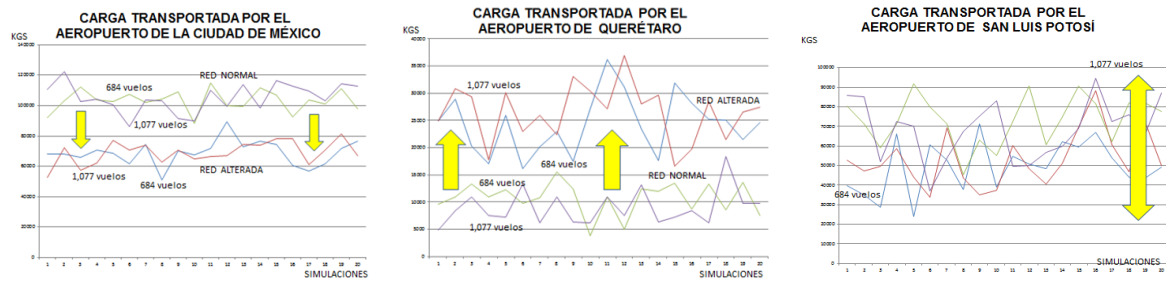
La simulación matemática de líneas de espera compara la red actual de carga aérea contra un cambio de rutas aéreas del aeropuerto de la capital hacia los aeropuertos de México, Querétaro y San Luis Potosí. Los resultados principales se muestran a continuación de manera gráfica, para los aeropuertos de interés, que son México, Querétaro y San Luis Potosí.

Las Fig. 5, 6, 7 y 8 muestran los impactos que se pueden obtener en los aeropuertos de (a) México, (b) Querétaro y (c) San Luis Potosí por la realización de los cambios mencionados. La Fig. 5 muestra el comparativo en cuanto a las diferencias en carga transportada. En tanto, la Fig. 6 lo hace con respecto al porcentaje de participación de cada aeropuerto, la Fig. 7 por el tiempo de espera total en cada uno y la Fig. 8 por el número de aviones que no tienen que esperar en cada caso.

El porcentaje de participación de México disminuye del 52% al 12%, lo que permite descongestionar sus operaciones. Además, reduce los rangos de carga. En cuanto a los tiempos de espera, disminuirían de 3.5 minutos a 30 segundos cuando hay máximas operaciones aéreas. Por último, se aprecia que el número de

aeronaves con tiempos de espera igual a cero crecería, pasando de 10 unidades a 30. Las flechas en las figuras indican los cambios antes mencionados.

10



Para el aeropuerto de Querétaro, la participación en la red de carga crece del 1 al 12%. La carga transportada pasa de 5 a 30 toneladas. En cuanto a las variables operativas de tiempo de espera y número de aeronaves sin espera, no representan valores indeseables: la primera con 2 minutos y 1077 vuelos por día; la segunda, al pasar de 50 a un valor aceptable de 25.

Por último, para el aeropuerto de San Luis Potosí se observa buena estabilidad, con rangos de 40 a 80 toneladas. El crecimiento pasa del 5% al 30%. Por otro lado, los tiempos de espera son bastante normales, y oscilan entre 30 y 120 segundos, aun cuando el flujo suba a 1077 vuelos por día. Con respecto al número de aeronaves con tiempo de espera igual a cero, disminuye al pasar de 30 a 20.

VI. CONCLUSIONES

La toma de decisiones sobre la mejor ubicación de un conjunto de aeropuertos, para ofrecer el mejor desempeño, está sujeta a diversos criterios y constituye una tarea compleja. La resolución mediante opiniones de juicio conduce a resultados sin sustento. El procedimiento factible es el uso de modelos que clarifiquen las alternativas y puedan ser comparadas conforme a medidas objetivas, para garantizar el buen resultado.

Con la visión de ingeniería de sistemas, que permite estudiar múltiples alternativas, se accede a otras soluciones no consideradas habitualmente en este sector. El análisis de redes sociales, que se ha aplicado en una diversidad de disciplinas, que incluyen la ingeniería, muestra en esta problemática una solución novedosa, ya que su bondad está en la precisión que otorga sus principales indicadores.

Luego de elaborar un modelo de red que representa las condiciones iniciales de los principales aeropuertos mexicanos, con sus interconexiones, se evalúan los parámetros de acuerdo con el análisis de redes sociales. Resalta en éste la centralización de los flujos por el aeropuerto de la Ciudad de México, reflejado en saturación, congestión, largas esperas, con la pérdida de oportunidades de desarrollo en sedes del interior del país.

Se destaca entonces la oportunidad de aplicar las herramientas de visualización, análisis y simulación de las redes sociales, para sugerir nuevas distribuciones de los flujos o incorporar nuevas instalaciones aeroportuarias, como en el caso del aeropuerto de Santa Lucía en el Estado de México, para lo cual la simulación de las alternativas permitirá la comparación de sus parámetros, para sustentar la decisión.

En este sentido, se ilustra el resultado de una de las experimentaciones. Se considera el posible cambio en las rutas de carga para otorgar mayor participación a las regiones que cubren los aeropuertos de Querétaro y de San Luis Potosí, reduciendo la contribución del aeropuerto de la capital, a la vez que proporcionan una cercanía mediana a la Ciudad de México.

Para analizar los efectos y dictaminar la mejoría, un indicador importante es la centralidad de cercanía. Con el cambio, el indicador que era de 62 alcanza el valor de 71 para el aeropuerto de Querétaro. El porcentaje de participación de México disminuye del 52% al 12%, lo que permite descongestionar sus operaciones, reduce los tiempos de espera de 3.5 minutos a 30 segundos y las aeronaves con tiempo de espera de cero pasarían de 10 a 30 unidades. Para Querétaro, la participación en la red crecería de 1 a 12% y la carga transportada pasaría de 5 a 30 toneladas. Y para San Luis Potosí, el crecimiento pasaría de 5 a 30%, con aumento en el rango de carga de 40 a 80 toneladas.

La bondad del análisis de redes sociales es la precisión que otorgan varios de sus indicadores sobre otros tipos de redes. Además, aunque la propuesta planteada sobre cómo mejorar la red es muy lógica, este estudio permite sustentarlo con bases profundas y sólidas.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Internacional de Transporte Aéreo: (IATA), “Comunicado 05”, 2019. [Online] Available: <https://www.iata.org/contentassets/12851812b6e6455eb8363726eb326fef/2020-02-06-01-sp.pdf>
- [2] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *Informe Anual 2017*. [Online] Available: <https://www.icao.int/annual-report-2017/Pages/ES/the-world-of-air-transport-in-2017.aspx>
- [3] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), *Informe Anual 2018*. [Online] Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx#:~:text=Montreal%2C%2031%20de%20diciembre%20de,%2C1%25%20respecto%20de%202017>
- [4] Mott MacDonald, Annual Analyses of the EU Air Transport Market 2016. European Commission, 2017. www.mottmac.com
- [5] Cámara de Diputados, “Evolución del Gasto del Ramo 09: Comunicaciones y Transportes 2012-2017”, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas CEFP, 2018. [Online] Available: <https://cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2018/notacefp0332018.pdf>
- [6] Instituto Mexicano del Transporte, “Planeación de Infraestructura en México y su Relación con la Logística”. [Online] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VyTAgbUul8c>
- [7] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Aviación Mexicana en Cifras 1991-2016”, SCT, Subsecretaría de Transporte, 2016. [Online] Available: <https://library.co/document/y8pov40z-aviación-mexicana-en-cifras.html>
- [8] O. Castillo, “Infraestructura y tratados, necesarios para mover carga: Roberto Kobeh”, T21, 2015. [Online] Available: <http://t21.com.mx/aereo/2015/05/18/infraestructura-tratados-necesarios-mover-carga-roberto-kobeh>
- [9] Inbound Logistics Latam, “Sudamérica ante el Índice de Desempeño Logístico”, 2018. [Online] Available: <http://www.il-latam.com/blog/business-context/sudamerica-ante-el-indice-de-desempeno-logistico>
- [10] Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México, “Actualización del Plan Maestro del NAICM”, 2018. [Online] Available: <https://gacm.gob.mx>
- [11] D. L. Bryan y M. E. O’Kelly, “Hub-and-spoke networks in air transportation: An analytical review”, *Journal of Regional Science*, vol. 39, pp. 275-295, 1999. [Online] Available: <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00134>
- [12] P. Malighetti, G. Martini, R. Redondi y D. Scotti, “Air transport networks of global integrators in the more liberalized Asian air cargo industry”, *Transport Policy*, vol. 80, pp. 12-23, 2019. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.04.021>
- [13] Y. Zhou, J. Wang y G. Huang, “Efficiency and robustness of weighted air transport networks”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 122, pp. 14-26, 2019. DOI: 10.1016/j.tre.2018.11.008
- [14] A. Bombelli, B. F. Santos y L. Tavasszy, “Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 138, No. 101959, 2020. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101959>
- [15] B. Shepherd, A. Shingal y A. Raj, “Value of Air Cargo: Air Transport and Global Value Chains 2016”, *IATA Developing trade consultants* (diciembre 6, 2016). [Online] Available: <https://www.iata.org/contentassets/307646ccaf10488f9ee240c87d8f72dd/value-of-air-cargo-2016-report.pdf>
- [16] J. Wong. y T. Wang, “Airport connectivity: Definition, measurement, and application”, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 12, pp. 922-938, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.11175/easts.12.922>
- [17] L. Rocha, “Dynamics of air transport networks: A review from a complex systems perspective”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, pp. 469-478, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.12.029>
- [18] Y. Madhwal y Z. Avdeeva, “Planning in aircraft industry based on prediction of air traffic”, *Procedia Computer Science*, vol. 122, pp. 1047-1054, 2017. DOI:10.1016/j.procs.2017.11.472
- [19] M. Song y G. Yeo, “Analysis of the air transport network characteristics of major airports”, *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 33, pp. 117-125, 2017. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2017.09.002>
- [20] P. Ren y L. Li, “Characterizing air traffic networks via large-scale aircraft tracking data: A comparison between China and the US networks”, *Journal of Air Transport Management*, vol. 67, pp. 181-196, 2018. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.12.005>
- [21] A. Herrera, *Simulación de operaciones aeroportuarias. El caso de despegues y aterrizajes en el aeropuerto de la Ciudad de México*, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 180, 2001. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt180.pdf>
- [22] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Estadística operacional origen-destino: El servicio regular nacional, vuelos, pasajeros y carga”, SCT, 2019. www.sct.gob.mx
- [23] S. P. Borgatti, M. G. Everett y L. C. Freeman. *Ucinet for Windows: Software for Social Network Analysis*, Harvard, MA: Analytic Technologies, 2002.
- [24] N. Aguilar-Gallegos, E. Martínez y J. Aguilar, *Análisis de Redes Sociales: Conceptos Clave y Cálculo de Indicadores*, Universidad Autónoma de Chapingo, Serie Metodología y Herramientas para la Investigación, 2017. [Online] Available: <https://ciestaam.edu.mx/publicaciones2018/metodologias/analisis-de-redes-sociales.pdf>
- [25] L. C. Freeman, “Centrality in social networks: Conceptual clarification”, *Social Networks*, vol. 1, pp. 215-239, 1979. [Online] Available: [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- [26] W. de Nooy, A. Mrvar y V. Batagelj, *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*, New York: Cambridge University Press, 2005.
- [27] M. O. Jackson, *Social and Economic Networks*, Princeton University Press, 2008.

- [28]S. P. Borgatti, M. G. Everett y J. C. Johnson, “Analyzing Social Networks”, *Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, vol. 27, pp. 141-145, 2013. [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/redes>
- [29]T. W. Valente y R. K. Foreman, “Integration and radiality: Measuring the extent of an individual’s connectedness and reachability in a network”, *Social Networks*, vol. 20, pp. 89-105, 1998. DOI:10.1016/S0378-8733(97)00007-5
- [30]PromPerú, “México, guía de mercado multisectorial”, Departamento de Inteligencia de Mercados, 2021. [Online] Available: <https://recursos.exportemos.pe/boletin/guia-mercado-multisectorial-mexico-2021.pdf>
- [31]Y. Zhou, S. Li, T. Kundu, X. Bai y W. Qin, “The Impact of Network Topology on Air Transportation Robustness to Pandemics”, *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 2249-2261, 2021. DOI: 10.1109/TNSE.2021.3085818
- [32]L. Lusiantoro y W. S. Ciptono, “An Alternative to Optimize the Indonesian’s Airport Network Design”, *Gadjah Mada International Journal of Business*, vol. 14, no. 3, pp. 267-302, 2012. <https://jurnal.ugm.ac.id>
- [33]X. Xu, Z. Zhou, Y. Dou, Y. Tan y T. Liao, “Sustainable Queuing-Network Design for Airport Security Based on the Monte Carlo Method”, *Sustainability*, vol. 10, no. 2, art. 1, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10020001>
- [34]J. Guo, Z. Yang, Q. Zhong, X. Sun y Y. Wang, “A Novel Resilience Analysis Methodology for Airport Networks System from the Perspective of Different Epidemic Prevention and Control Policy Responses”, *PLOS One*, vol. 18, no 2, art. e0281950, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281950>
- [35]F. Ramírez Escobedo, “Modelo Sistémico basado en Redes Visuales para Representar la Información sobre Propiedad Intelectual en el IPN”, Tesis de Doctorado en Ingeniería de Sistemas, México: IPN, 2016.

Automatización de una incubadora de aves

Automation of a Poultry Hatchery

Luis Manuel **Valverde-Cedillo**¹
Geny Itzamar **Ochoa-Rodriguez**²
Cristian Vicente **Salazar-Hernandez**³

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-1204-883X> | luis_vc@tesch.edu.mx

² <https://orcid.org/0000-0001-8928-883X> | geny_or@tesch.edu.mx

³ <https://orcid.org/0000-0003-1016-9005> | cristian_sh@tesch.edu.mx

Recibido 16-11-2022, aceptado 28-02-2023.

Resumen

El presente proyecto muestra la automatización de una incubadora de huevos desde cero, con múltiples sensores y dispositivos conectados a través de Arduino.

La monitorización se realiza mediante la instalación de los sensores de humedad y de temperatura, donde los actuadores conformados por un ventilador, dos focos que producen el calor y el humidificador se encargan de controlar la humedad del ambiente, y un servomotor que da la rotación de los huevos en determinado tiempo, donde todos los sensores están controlados por Arduino que conforman lo que es nuestro sistema de control.

Donde también se contemplan las mejores condiciones para la crianza de las aves (pollitos) de acuerdo con su desarrollo biológico, con una alimentación natural basada en una mezcla de semillas de soya, maíz, cebada, trigo, sorgo, mezcladas con alfalfa, con una hidratación constante teniendo una natalidad del 99%.

Palabras clave: incubadora, monitorización, sensores, sistema de control.

Abstract

This project shows the automation of an egg incubator from scratch, with multiple sensors and devices connected through Arduino.

The monitoring is carried out by installing humidity and temperature sensors, where the actuators are made up of a fan, two sources that produce heat and the humidifier that is responsible for controlling the humidity of the environment, and a servomotor that rotates the eggs in a certain time, where all the sensors are controlled by arduino according to what is our control system.

Where the best conditions for raising birds (chicks) are also contemplated according to their biological development, with a natural diet based on a mixture of soybean seeds, corn, barley, wheat, sorghum, mixed with alfalfa, with a Constant hydration having a birth rate of 99%.

Index terms: incubator, monitoring, sensors, control system.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el mundo se encuentra en los procesos industriales por la alta competitividad empresarial y la necesidad de aumentar los procesos de producción, en donde la automatización permite generar un incremento sustancial de la producción incorporando elementos y dispositivos tecnológicos para tener un control específico sobre los procesos y sus comportamientos.

El prototipo que se presenta es una incubadora automatizada de huevos de aves que a través de un sistema de control de lazo cerrado es utilizada por las personas que trabajan en el área de avícola en las zonas rurales del valle de México, cuya función es crear un ambiente controlado con la humedad, la temperatura adecuada para el crecimiento de seres vivos [1].

II. ANTECEDENTES

La avicultura es la rama de la ganadería que trata de la cría, explotación y reproducción de las aves domésticas con fines económicos, científicos o recreativos. Así pues, en su más amplio sentido la avicultura trata igualmente de cualquier especie de ave que se explote en las granjas para el provecho o utilidad del hombre. Desde sus inicios a mediados del siglo XX, uno de los objetivos más importantes que tiene la avicultura en México, es proveer a la población alimentos ricos en proteína de calidad.

Es conocida la importancia de la Industria Avícola en el consumo nacional, particularmente para los sectores sociales más pobres de la población, lo cual exige realizar un análisis de la estructura productiva y territorial de la actividad avícola, además de una retrospectiva de su expansión en el corto y mediano plazo con una visión alineada al propósito de reducción de la pobreza y desigualdad regional, así como avanzar hacia la autosuficiencia alimentaria. El reto conlleva a mantener una línea de crecimiento en la oferta interna de los alimentos derivados de la Industria Avícola, así como la interacción que significa la visión de autosuficiencia alimentaria con la producción interna de sus insumos, y el comportamiento de los precios al consumidor de estos productos [2].

La industria avícola nacional representa uno de los sectores estratégicos para la alimentación en México, al significar 28.5 por ciento de la producción nacional pecuaria, con un consumo per cápita anual de 34.2 kilogramos de pollo, 23 kilogramos de huevo y 1.3 kilogramos de pavo [3] (véase Fig. 1).

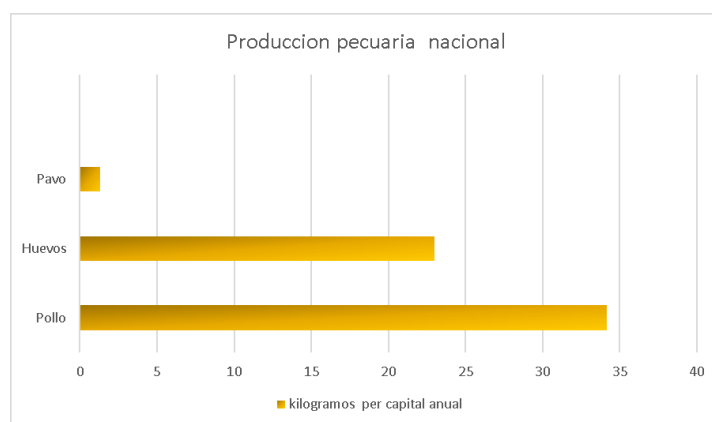


Fig. 1. producción nacional pecuaria, con un consumo de per cápita anual.

A. Ciclo de vida de un pollo

Todo comienza cuando la gallina pone sus huevos el cual comenzara a empollarlo (se sentará sobre ellos, en un nido de paja) para mantenerlos calientes durante 21 aproximadamente o hasta que los huevos se abran, véase Fig. 2). Los pollos comienzan a picotear la cascara del huevo hasta lograr abrirse paso y salir del cascaron [4].



Fig. 2. Gallina empollando sus huevos durante 21 días hasta su eclosión.

En las cuatro primeras semanas de vida los pollos necesitan tener una temperatura de 32° centígrados, después de las cuartas semanas, ya los pollos pueden regular su temperatura corporal bajaremos la temperatura a 25° centígrados. Durante las 24 semanas se mantendrán con la luz a baja intensidad, pero constante. La cría de pollos de engorde va desde la semana cero hasta la semana 23, durante esta etapa la alimentación, la hidratación y el medio ambiente, son los factores principales para un buen desarrollo del pollo, si se falla en alguno de estos aspectos seguramente tendremos una cría débil y enfermiza [4].

B. Viabilidad de un huevo

Un huevo fértil se caracteriza por un blastodermo que tiene una apariencia anular claramente definida (visto como un anillo blanco simétrico con un área clara en el centro). Si por cualquier razón el huevo es infértil, se ve un blastodisco con forma irregular y con volantes (véase Fig.3) [5].



Fig. 3. Huevo fértil con blastodermo ala izquierda, un huevo infértil con blastodisco a la derecha

Se debe hacer una selección de alta calidad de los huevos fértiles. Esto se verá reflejado en un buen desarrollo de los embriones de pollo. Para eso, deben descartarse los huevos que presenten estas características:

- Huevos con suciedad visible (heces).
- Huevos con la cáscara rota o con grietas.
- Huevos cuya cáscara presente porosidad (favorece la entrada de microorganismos).
- Huevos con apariencia externa deforme (alargados o con deformidades en su cáscara, blandos o arrugados) [6].

4

Dicho esto, es importante garantizar una manipulación y un almacenamiento correctos de los huevos fértiles, de modo que los embriones de buena calidad puedan permanecer en perfecto estado [5].

C. Incubación

Una incubadora es un equipo donde se depositan los huevos fértiles para completar su desarrollo hasta la eclosión donde nace un pollito. La incubación artificial de huevos fértiles es un proceso de corta duración, inicia en la granja el proceso en la planta inicia una vez los huevos ingresan y luego son seleccionados y clasificados; la clasificación se realiza por tamaño y calidad del cascaron, el siguiente paso es realizar la carga de las maquinas incubadoras las cuales se encargan de simular las condiciones ambientales en las que las gallinas incuban sus huevos naturalmente [6].

D. Parámetros de la incubación

Los parámetros para lograr una incubación adecuada y controlada fundamentalmente son: la temperatura, la humedad, la ventilación y volteo de los huevos

Temperatura: Es el factor más importante y delicado de toda la incubación. Se debe vigilar constantemente cualquier cambio en la temperatura pues su incremento o disminución tienen graves consecuencias. Los huevos en incubación son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura. Además, este parámetro define la velocidad de desarrollo que se están incubando dentro de los huevos. De manera general se recomienda que esté entre 37 y 38°C, y disminuir esta durante los 3 últimos días de la incubación (día 18 a 21) [6].

Humedad: Los niveles óptimos de humedad oscilan entre el 40% y el 50%, mientras que en el último tramo del periodo de incubación, cuando el huevo ha agotado todas sus reservas de agua, se debe subir la humedad hasta el 65% para reblandecer las membranas y facilitar la eclosión del pollito. Durante la incubación, cada huevo debe perder peso, una pérdida de peso que debe ser continua y situarse entre el 15 y el 20%.

Ventilación: La ventilación del aire es un aspecto indispensable, sobre todo, cuando los embriones llegan a la última fase de su desarrollo. El aire que circula por el interior de la incubadora proporciona el calor y humedad necesarios para el desarrollo del huevo, por lo que para asegurar una circulación de aire eficiente se requiere mantener la incubadora ventilada y que el aire interior se renueve periódicamente.

Volteo de los huevos: Las gallinas, cuando están incubando en el nido, voltean y mueven sus huevos con bastante frecuencia. El volteo de los huevos es imprescindible, desde que los huevos se introducen en la incubadora hasta dos o tres días antes de que el pollito vaya a eclosionar, para que el desarrollo de los embriones se efectúe con total normalidad. Por tanto, durante la incubación artificial, este procedimiento debe imitarse haciendo uso de los dispositivos mecánicos de que dispone la incubadora. [7]

E. Estado del arte

En los últimos años se han desarrollado diferentes aportaciones sobre la implementación tecnológica de dispositivos u aplicaciones para ayudar en el desarrollo de la producción avícola conocidas como incubadoras de aves, sin embargo, durante su creación ha tenido varios factores de deficiencia, como el control de las variables (humedad, temperatura), aunado a esto los costos son bastantes elevados.

5

Dispositivo u prototipo	Características	Costo
Hethya Incubadoras de huevo	Posee una Fuente de alimentación dual. Giro automático de huevos. Monitoreo y control de humedad: Espacio ajustable para la bandeja de huevos: la distancia entre los rodillos se puede ajustar. La distancia entre los rodillos se puede ajustar de acuerdo con el tamaño de diferentes huevos de cría	\$4,252.26
Aut Pollo Codorni Guajolote Promoción 4499	*Resistencia, (es para generar calor). *Termostato automático DIGITAL, (espera controlar la temperatura interna). *Volteo automático, (es para que el embrión no pegue a la membrana del huevo y este no muera al nacer). *Bandeja de agua, (es para generar la humedad para la incubación del huevo). *Termómetro integrado en termostato digital (medición interna). *Nacedera, (es para cuando después de los últimos días de incubación se ponga el huevo y Nasca cómodamente el embrión). *Corriente de luz 110 volts luz de casa y consumo es de 120watts muy económica en gastos de luz. *Fabricada en mdf melaminado es muy limpio y muy fácil de limpiar.	\$7,900
Incubadora Automática	Sistema de control digitalizado. - Movimiento automático. - Control de temperatura Automático. - Temperatura programable por el usuario. - Equipada con alarmas de temperatura alta y baja con bloqueo automático. - Generación de humedad mediante bandeja de agua. - Ventilación interior con sistema de aire forzado a base de ventilador. - Interruptor de luz interna para mejorar la visibilidad.	\$6560 .40
Nacedera Avícola 300 Huevos, Pollo, Pato, Codorniz	- Sistema de control digitalizado. - Control de temperatura Automático. - Temperatura programable por el usuario. - Equipada con alarmas de temperatura alta y baja con bloqueo automático. - Generación de humedad mediante bandeja de agua. - Puerta con vidrio para permitir la visibilidad al interior del gabinete. - Fabricadas de melamina plástica de 15mm. - Gabinete resistente a la humedad, térmico y lavable. - Sistema de alimentación a 110 volts. Consumo promedio aproximado de 80 watts. - Reguladores de aire y sello hermético. - Eficiencia arriba del 85% en huevo fértil. - Incluye manual de operación y guía de incubación.	\$12,604

III. METODOLOGÍA

La finalidad de este proyecto es la construcción de una incubadora de huevos de ave con el sistema de control automático para que sea funcional aplicando la metodología de prototipo que está relacionada con la mejora continua y el Ciclo de Deming que consiste en un proceso iterativo enfocado en diseñar, implementar, medir y ajustar un plan [8].

Donde la monitorización se realiza mediante la instalación de los sensores DHT22 que es de temperatura y humedad relativa de buen rendimiento, donde los actuadores conformados por un ventilador, dos focos de 100watts que producen el calor y el humificador que se encarga de controlar la humedad del ambiente, y un servomotor que da la rotación a la bandeja de los huevos en determinado tiempo, todos los sensores están controlados por arduino nano que conforman lo que es nuestro sistema de control.

A. Sistema de control de temperatura y humedad.

Este sistema de lazo cerrado se mide la temperatura y la humedad a través del sensor HTD22, donde a partir del valor deseado en este caso de $37.5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ que es la temperatura deseada para la incubación, donde influyen los focos de 100 watts que actúan como una resistencia de calor junto con el ventilador para que ejecutar la acción de control.

En la humedad mediante el HTD22 que medirá el porcentaje de humedad que proporciona el humificador y debe estar en un rango de [40 - 50] % dentro de la incubadora (véase Fig. 4).

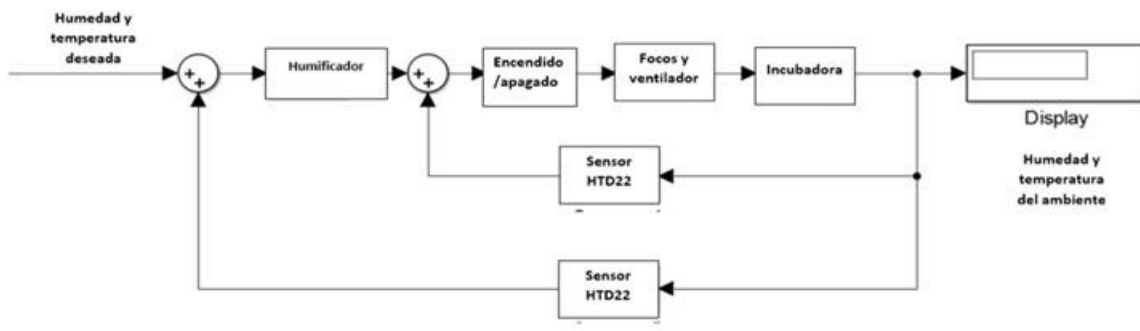


Fig. 4. Sistema de temperatura y humedad de lazo cerrado.

B. Sistema de volteo

Este sistema de volteo es de lazo abierto donde el DS323 que es el timer y HC-SR04 que es el sensor de proximidad hará que se accione el servomotor y mueva nuestra bandeja en la cual están colocados los huevos para así evitar que la yema se adhiera a la cascara, y garantizar el desarrollo del embrión (véase Fig. 5).

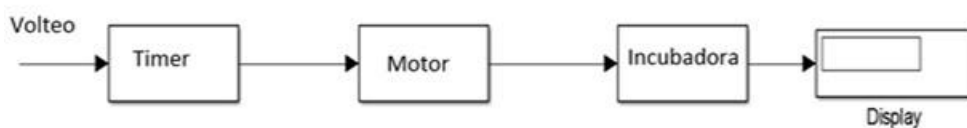


Fig. 5. Sistema de control de lazo abierto de volteo.

7

C. Diseño y construcción de la incubadora

El diseño de la incubadora automatizada de huevos de ave elaborado en el Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, consta de varias etapas como primera fase se desarrolló el prototipo en el software de SolidWorks donde se ve la dimensión y la colocación de los elementos como, los focos, el ventilador el humificador etcétera (véase Fig. 6).

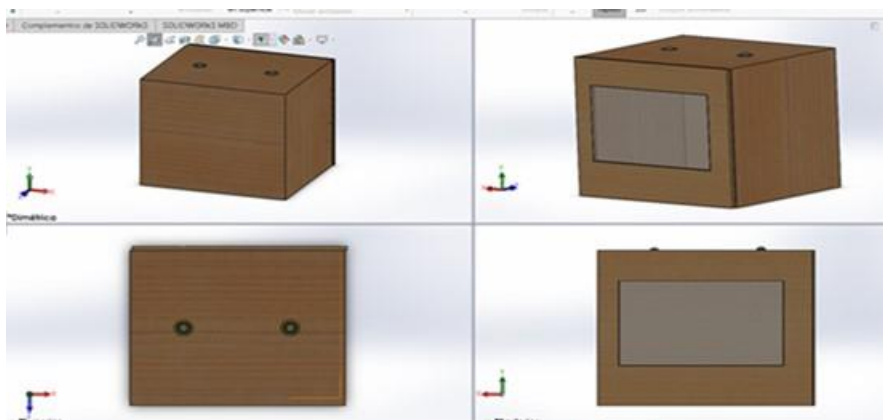


Fig. 6. Diseño de la Incubadora en SolidWorks con los elementos (focos y ventilador).

La creación del prototipo que se hizo en MDF donde se cortaron 2 piezas de 43*43cm, otras 2 piezas de 55*55 cm, y 2 piezas de 47*47cm, donde en una de las piezas de 55*55 se le colocó un vidrio para poder visualizar el proceso de incubación de los huevos. Para armar la incubadora se atornilló formando un cubo, donde la pieza que tiene el vidrio se unificó con la base mediante dos bisagras. Así mismo se colocó lo que es la bandeja de volteo y el humificador. (Fig.7)



Fig. 7. Prototipo de la incubadora en MDF.

D. Electrónica, programación y simulación

La programación se realizó en Arduino IDE, este programa ocupa un lenguaje C++, adaptado para cargarse en las placas propias de este desarrollador, dado que se ocupó una placa Arduino nano [9]. Debido a que el código es abierto permite la utilización de diversos componentes y librerías. Siendo la versatilidad la principal razón de apoyo en la programación. En el cual se determinaron las salidas y las entradas de la señal de la incubadora delimitando los rangos de temperatura, de humedad, también el conteo de los días que lleva en funcionamiento. (véase Fig. 8).

```
#include <Adafruit_BusIO_Register.h>
#include <Adafruit_I2CDevice.h>
#include <Adafruit_I2CRegister.h>
#include <Adafruit_SPIDevice.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //ya incluí la librería I2C RCTlib
#include <RTClib.h> // ya incluí la librería del reloj
#include <EEPROM.h>
#include <DHT.h>

//Definimos los pines de entrada y salida
byte PIN_BTN_DOWN = 2;
byte PIN_BTN_SETUP = 3;
byte PIN_BTN_UP = 4;
byte PIN_DS18B20 = 0; //no utilizado
byte PIN_DHT22 = 5;
byte PIN_BUZZER = 6;
byte PIN_ACTU_0 = 8;
byte PIN_ACTU_1 = 9;
byte PIN_ACTU_2 = 10;
byte PIN_ACTU_3 = 11;
byte PIN_TRAY_ECHO = A2;
byte PIN_TRAY_TRIG = A3;
//-----
```

Fig. 8. Parte de la programación de la incubadora en arduino nano.

En el diagrama de conexión que se elaboró utilizando Fritzing [10] que muestra cómo están conectados los elementos (arduino nano, display LCD20*4, DS3231, adaptador LCD I2C, DHT22 HC-SRC, push botón buzzer y los módulos relé de 2 a 5v de acuerdo a las necesidades de implementación de nuestro sistema de control (véase Fig. 9).

Se utiliza el diagrama electrónico para la automatización de la incubadora de huevos de aves que fue realizado en el programa de computación PROTEUS [11], destinado al diseño y simulación de circuitos electrónicos, como se observa en la Fig.10.

9

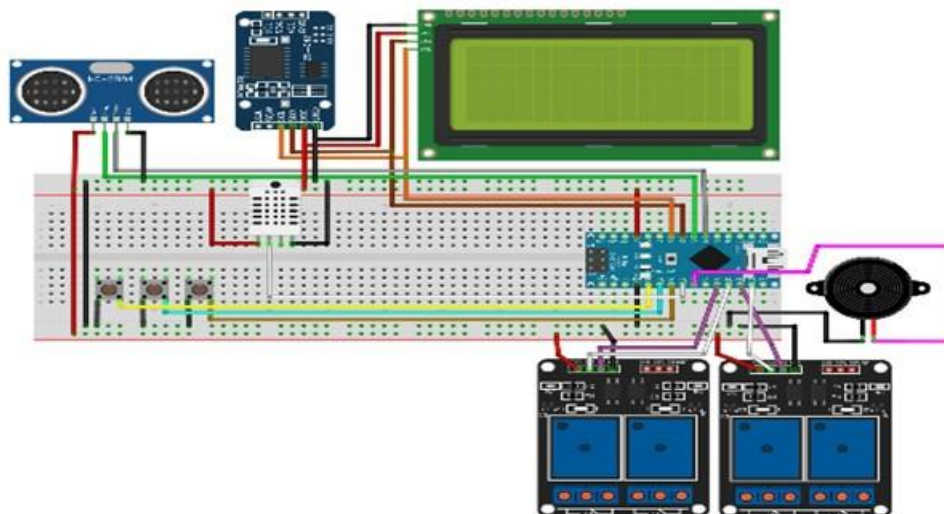


Fig. 9. Diagrama de conexión elaborado en Fritzing.

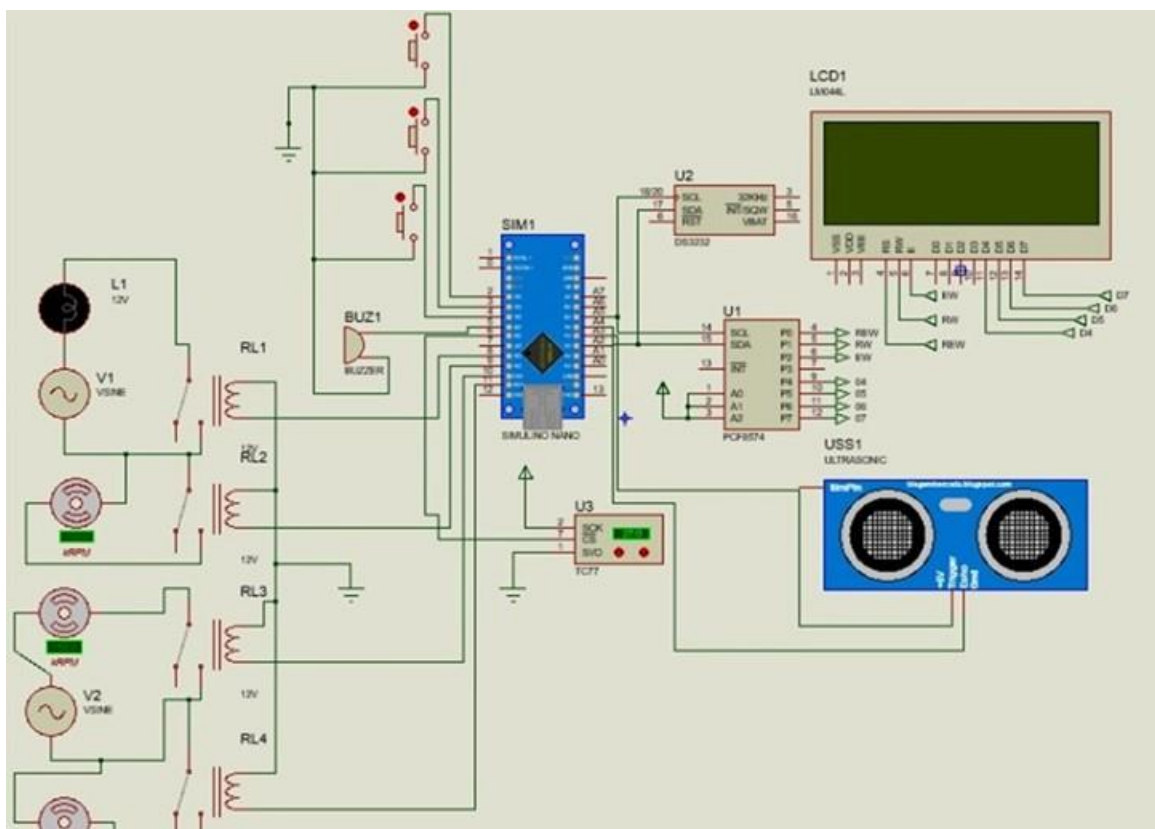


Fig. 10. Diagrama electrónico de la incubadora.

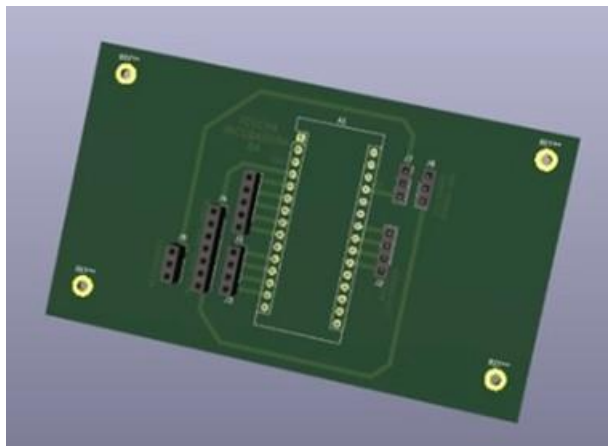


Fig. 11. Diseño de PCB en KidCAD.

IV. RESULTADOS

Dentro de nuestros resultados se obtiene la parte tangible que es la incubadora de huevos de aves ya armada y funcionando, la implementación de la PCB que es el Sistema de control general (véase Fig. 12) que a través de la LCD muestra los valores de la temperatura, humedad, el conteo de los días que lleva en funcionamiento.



Fig. 12. Sistema de control general de la incubadora.

Teniendo la incubadora se realizaron una serie de 17 pruebas en un periodo de 12 meses que garantizan su funcionalidad. Tomando una muestra de población en cada una de ellas de 30 huevos de gallina fértiles seleccionados en un principio por sus cualidades al no ser huevos con la cáscara rota, grietas o deformes, huevos cuya cáscara presente porosidad.

En cada una de las pruebas se consideraron las siguientes estadísticas

- La Viabilidad que representa en 99 % por ciento que equivale a 503 pollos nacidos vivos de los 510 huevos que se seleccionaron como fértiles durante las 17 pruebas
- La incubabilidad del 99 % por ciento sobre el proceso de incubación al tener 503 huevos eclosionados.
- La eclosionabilidad de mortalidad de los pollitos nacido al primer día es el 99% por ciento.

El cual garantiza una incubación adecuada y viable en la incubadora automatizada de aves.

TABLA 1
PRUEBAS DE VIABILIDAD, INCUBILIDAD Y ECLOCIONALIDAD DE LA INCUBADORA AUTOMATIZADA.

	Nº POLLITOS NACIDOS VIVOS	Nº DE HUEVOS FERTILES	VIABILIDAD	INCUBABILIDAD	ECLOCIONALIDAD
PRUEBA 1	29	30	97%	97%	97%
PRUEBA 2	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 3	29	30	97%	97%	97%
PRUEBA 4	29	30	97%	97%	97%
PRUEBA 5	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 6	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 7	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 8	29	30	97%	97%	97%
PRUEBA 9	28	30	93%	93%	93%
PRUEBA 10	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 11	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 12	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 13	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 14	29	30	97%	97%	97%
PRUEBA 15	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 16	30	30	100%	100%	100%
PRUEBA 17	30	30	100%	100%	100%
TOTAL	503	510	99%	99%	99%

A continuación, se muestra una de las pruebas de cómo se llevó a cabo la incubación, desde el momento de seleccionar los huevos que no tuvieran el cascaron roto, o con mucha porosidad.

Se colocaron los 30 huevos dentro de la incubadora de aves que es la capacidad máxima, en un periodo de incubación de 21 días a una temperatura de $37.5^{\circ}\text{C} \pm 1$ y una humedad de [40–50] (véase Fig. 13).

Durante el primer periodo de incubación se inspeccionaron los huevos en el día 7 para observar que los órganos importantes estuvieran desarrollándose de manera adecuada (véase Fig. 14), lo que corresponde al 2do y tercer periodo es cuando se forma el esqueleto, las garras y el pico del pollo para que pueda romper el cascaron entrando al cuarto periodo que son los días finales de la incubación (véase Fig. 15).

TABLA 1
MONITOREO DE LA MUESTRA DE 30 HUEVOS EN LA INCUBADORA.

PERIODO	DÍA	TEMP. °C	HUMEDAD	VOLTEO
PRIMER	1	37.5	45	4-6 VECES
	2	37.5	45	4-6 VECES
	3	37.5	45	4-6 VECES
	4	37.5	45	4-6 VECES
	5	37.5	45	4-6 VECES
	6	37.5	45	4-6 VECES
	7	37.5	45	4-6 VECES
SEGUNDO	8	37.5	45	4-6 VECES
	9	37.5	45	4-6 VECES
	10	37.5	45	4-6 VECES
	11	37.5	45	4-6 VECES
TERCER	12	37.5	45	4-6 VECES
	13	37.5	45	4-6 VECES
	14	37.5	45	4-6 VECES
	15	37.5	45	4-6 VECES
	16	37.5	45	4-6 VECES
	17	37.5	45	4-6 VECES
	18	37.5	45	4-6 VECES
	19	37.5	45	4-6 VECES
CUARTO	20	37	45	4-6 VECES
	21	37	45	4-6 VECES



Fig. 13. Primer día de la incubación de los 30 huevos.



Fig. 14. inspección de los 30 huevos durante el primer periodo.



Fig. 15. Cuarto periodo donde los pollos rompen y salen del cascarón.

Los resultados obtenidos son favorables y por ello surgió la necesidad de poder adaptar un lugar donde tuviéramos los polluelos que iban naciendo realizamos lo que es un cuadro de densidad de pollos según su edad después de nacidos.

	pollitos / m²2		pollitos / 10 m²2		pollitos / 12m²2		pollitos / 15 m²2		pollitos / 20 m²2		pollitos / 30 m²2		pollitos / 60m²2		pollitos / 75m²2	
1 a 3 días	55	60	550	600	660	720	825	900	1100	1200	1650	1800	3300	3600	4125	4500
4 a 6 días	40	50	400	500	480	600	600	750	800	1000	1200	1500	2400	3000	3000	3750
7 a 9 días	30	40	300	400	360	480	450	600	600	800	900	1200	1800	2400	2250	3000
10 a 12 días	20	30	200	300	240	360	300	450	400	600	600	900	1200	1800	1500	2250
13 a 15 días	10	20	100	200	120	240	150	300	200	400	300	600	600	1200	750	1500
16 a 19 días	10		100		120		150		200		250		600		750	
21 días en adelante	8		80		96		120		160		200		480		600	

Fig. 16. Cuadro de densidad según la edad del pollo.

De acuerdo con los metros cuadrados para tener una población de 500 a 600pollitos se determina que

- De 1 a 3 días la población de 503 pollos con 10 m² es suficiente.
- 4 a 6 días para conservar la población de 503 pollos con 12 m² es suficiente.
- 7 a 9 días para conservar la población de 503 pollos con 15 m² es suficiente.
- 10 a 12 días para conservar la población de 503 pollos con 20 m² es suficiente.
- 13 a 15 días para conservar la población de 503 pollos con 30 m²es suficiente.
- 16 a 19 días para conservar la población de 503 pollos con 60 m² es suficiente.
- 21a días en adelante para conservar la población de 503 pollos se necesitan 75 m².

Se construyó un lugar donde los pollos se pudieran desarrollar (véase Fig. 17) una vez llegando a la madurez reproductiva se reparan para controlar su mortalidad.



Fig. 17. Los pollos que se han nacido en estas 17 pruebas.

Durante este proceso se obtuvo el peso de los pollitos al nacer que era de 35 gr a 50 gr en promedio de los 503, su tasa de natalidad del 99 %, al alcanzar su vida adulta con una alimentación natural basada en una mezcla de semillas de soya, maíz, cebada, trigo, sorgo, mezcladas con alfalfa, con una hidratación constante, alcanzaron un peso de 2,800 gr en 35 días contemplado los siguientes factores en su desarrollo ,como la energía que obtienen del alimento donde esta promueve el crecimiento de tejidos, mayores ganancias musculares y mantenimiento de sus funciones; las proteínas y aminoácido que generan el aumento de peso, conversión

alimenticia y el crecimiento; los macro minerales y vitaminas que son necesarias para el desarrollo óseo y la función del sistema nervioso e inmunológico (véase Fig. 18).



Fig. 18. Los pollos con una alimentación natural.

TABLA 3
PRUEBAS REALIZADAS EN CONDICIONES ADVERSAS.

	N° POLLITOS NACIDOS VIVOS EN PRUEBAS ADVERSAS	N° DE HUEVOS FERTILES	VIABILIDAD	INCUBABILIDAD	ECLOSIONALIDAD
PRUEBA 1	23	30	77%	77%	77%
PRUEBA 2	24	30	80%	80%	80%
PRUEBA 3	20	30	67%	67%	67%
PRUEBA 4	22	30	73%	73%	73%
PRUEBA 5	21	30	70%	70%	70%
PRUEBA 6	23	30	77%	77%	77%
PRUEBA 7	22	30	73%	73%	73%
PRUEBA 8	23	30	77%	77%	77%
PRUEBA 9	21	30	70%	70%	70%
PRUEBA 10	28	30	93%	93%	93%
TOTAL	227	510	76%	76%	76%

Donde se registraban temperaturas de 13°C por las noches y alcanzando temperaturas de hasta 27°C a medio día lo cual representa un reto para lograr mantener la temperatura óptima de incubación, esto generando otros problemas como lo son el aumento del 50 % por ciento en el consumo de energía eléctrica en un periodo de 24 horas.

Al tratar de mantener la temperatura los componentes electromecánicos (relevadores) sufren desgaste mecánico lo cual provoca que queden normalmente abierto o normalmente cerrado, esto provoca que la incubadora pueda mantenerse encendida en todo momento o este apagada lo cual genera fallas en el sistema. Donde se obtuvieron los siguientes datos

- La Viabilidad que representa en 76 % por ciento que equivale a 227 pollos nacidos vivos de los 510 huevos que se seleccionaron como fértiles durante las 10 pruebas
- La incubabilidad del 76 % por ciento sobre el proceso de incubación al tener 227 huevos eclosionados.
- La eclosionabilidad de mortalidad de los pollitos nacido al primer día es el 76% por ciento.

Comprobando lo anterior la incubación en condiciones desfavorables cuando los huevos ya han eclosionado presentan algunas deformaciones los pollitos tales como: encefalía craneal, picos cruzados, ausencia de los globos oculares, celosomía visceral, ciclope, duplicación posterior, duplicación anterior con encefalía craneal, falanges extras, ausencia de algunas de sus alas, piel traslucida que impiden su desarrollo natural.

V. CONCLUSIÓN

Durante la elaboración de este trabajo ha quedado establecida la importancia de la automatización de la incubadora de aves que ayuda a la incubación de manera artificial, garantizando eficiencia del 99% en la viabilidad, incubabilidad y la eclosión.

Cuyo funcionamiento es controlado en los sistemas de temperatura, humedad y volteo que proporciona los parámetros ideales dentro de la incubación que se ocupa en el desarrollo embrionario del huevo de gallina de manera inteligente y controlada por el hombre generando una interacción entre usuario y equipo. De esta manera se trata de evitar las malformaciones más comunes en los pollitos que se generan a causa de una inadecuada incubación

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, a los docentes de esta casa de estudios y a las autoridades correspondientes las facilidades obtenidas y apoyo para la generación de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Boletín Agrario, boletinagrario.com, 2022. Available: <https://boletinagrario.com> [Último acceso: jun. 2022].
- [2] CEDRSSA, “CDRSSA”, Palacio Legislativo de San Lázaro, CDMX, 2019.
- [3] Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, *Sector avícola, estratégico en las metas de autosuficiencia alimentaria en el país: Agricultura*, Gobierno de México, 2021. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/sector-avicola-estrategico-en-las-metas-de-autosuficiencia-alimentaria-en-el-pais-agricultura?idiom=es#:~:text=La%20industria%20av%C3%ADcola%20nacional%20representa,el%20secretario%20de%20Agricultura%20y> [Último acceso: 2022].
- [4] Poultrylife, *Ciclo de vida en la cría de pollos*, 2022. Available: <https://poultrylife.com/cria-de-pollos/ciclo-de-vida-en-la-cria-de-pollos/> [Último acceso: Sep. 2022].
- [5] G. Gundran, *Huevos Fértiles: La importancia de evaluar la calidad interna de los huevos*, aviNews.com, 2022. Available: <https://avinews.com/huevos-fertiles-la-importancia-de-evaluar-la-calidad-interna-de-los-huevos/#:~:text=La%20yema%20debe%20ser%20clara,embrionaria%20temprana%20durante%20la%20incubaci%C3%B3n> [Último acceso: 2022].
- [6] D. Gallego, *Proceso de incubación de pollito Ross 308 en planta de incubación. Barbosa-Antioquia (OPAV)*, Corporación Universitaria Lasallista, 2014. Available: http://repository.unilasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/1507/1/Incubacion_pollito_Ross_308.pdf
- [7] Finca Casarejo, *Parámetros en la incubación artificial de huevos de gallina*, 2019. Available: <https://www.fincacasarejo.com/noticias/articulos/parametros-en-la-incubacion-artificial-de-huevos-de-gallina/#:~:text=La%20temperatura%2C%20la%20humedad%2C%20la,el%20proceso%20de%20incubaci%C3%B3n%20artificial> [Último acceso: 2022].
- [8] L. Lozada, “La ciencia y el hombre”, *Revista de Ciencia y Tecnología de la Universidad Veracruzana*, vol. 13, no. 1, 2000.
- [9] Arduino, Arduino (foros y librerías), 2019. Available: <https://www.arduino.cc/>
- [10] Fritzing, Fritzing: Electronics Made Easy, 2022. Available: <https://fritzing.org/>
- [11] Labcenter Electronics, 2022. Available: <https://www.labcenter.com/>
- [12] KiCad EDA, *A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*, 2022. Available: <https://www.kicad.org/> [Último acceso: 2022]
- [13] KiCad EDA, *A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*, 2022. Available: <https://www.kicad.org/> [Último acceso: 2022]

Ecosistemas Digitales. Necesidad en el Sector Salud

Digital Ecosystems. Need in the Health Sector

Juan Bory Rodríguez¹, Jorge Arturo Reyes Bonilla²

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0002-1904-3233> | jboryr@ipn.mx

² <https://orcid.org/0000-0002-4618-8681> | jreyesb@ipn.mx

Recibido 02-12-2022, aceptado 15-02-2023.

Resumen

El propósito principal de esta revisión es mostrar como los ecosistemas digitales se han integrado en el sector de la salud, sus diferentes conceptos, formación y estructuras, así como sus ventajas en el desarrollo del proceso salud-enfermedad del hombre del Siglo XXI. Pretendemos fomentar el interés en este tema en la población científica para continuar el desarrollo de los ecosistemas digitales de salud y la vinculación de la Informática y las Telecomunicaciones en el mejoramiento continuo de los dominios de la calidad de vida actual. Además, se abordan las principales tendencias del Desarrollo Tecnológico en las ciencias médicas en lo que va de año 2022.

Palabras clave: ecosistemas digitales de salud, tecnología de la información y las comunicaciones, calidad de vida.

Abstract

The main purpose of this review is to show how digital ecosystems have been integrated into the health sector, its different concepts, formation and structures, as well as its advantages in the development of the health-disease process of man in the 21st century. We intend to promote interest in this topic in the scientific population to continue the development of digital health ecosystems and the linking of Information Technology and Telecommunications in the continuous improvement of the domains of the current quality of life. In addition, the main trends of Technological Development in the medical sciences are addressed so far in 2022.

Index terms: digital health ecosystems, information technology and communications, quality of life.

I. INTRODUCCIÓN

El 17 de mayo se celebra el Día de Internet, una fecha para valorar la interconexión entre sociedades a lo largo del mundo, gracias a tecnologías cada vez más eficientes [1]. Son muchas las ventajas conocidas de la aplicación del desarrollo tecnológico actual en las diferentes esferas de la sociedad y la medicina no está exenta, siendo la aplicación de los ecosistemas digitales es una muestra de ello.

Partiendo del concepto de ecosistemas en la naturaleza, se plantea que la interacción de diferentes actores entre sí y con una plataforma digital específica se considera entonces un ecosistema digital.

El proceso de digitalización lleva ya varios años de aplicación a nivel mundial, pero a pesar de eso fue la pandemia de covid 19 la que obligó a dar un salto importante en su aplicación en las diferentes esferas de la sociedad, además de la reducción de los costos y tarifas de las diferentes plataformas.

Un porcentaje considerable de médicos se mantiene conectados a la Internet, pero el uso varía de forma considerable en cada uno de ellos. Muchos médicos aceptan el dar consulta por medios virtuales, luego de la pandemia las cifras de consultas médicas virtuales aumentó considerablemente, así como incluir de forma virtual otros aspectos de la práctica médica como la emisión de recetas electrónicas y los expedientes o historial clínicos digitales.

Un ecosistema digital es un espacio donde intervienen diferentes actores, y en el caso de la salud, puede incluir médicos, grupos de hospitales, servicios de telemedicina, laboratorios y farmacias, entre otros. El correo electrónico, redes sociales, ofimática y la gestión de relaciones con clientes son algunos ejemplos de sus componentes [2].



Fig. 1. Componentes del ecosistema digital. Tomado de [10].

Los Ecosistemas Digitales en el Sector Salud tienen una gran ventaja desde el punto de vista en la funcionalidad de las consultas médicas, se rompe la barrera de la distancia y de las fronteras, además integran varias funciones al mismo tiempo más facilita la organización de la documentación médica. La integración de los ecosistemas de salud favorece una atención médica integral.



Fig. 2. Potencial de los ecosistemas digitales Tomado de [9].

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La salud digital se define como la integración de los componentes digitales, del desarrollo y plataformas informáticas en la Salud Pública. Abarcar diferentes tecnologías, como dispositivos portátiles, sensores, aplicaciones móviles, inteligencia artificial, cuidadores robóticos y registros electrónicos de comportamiento [3], [4].

Así también para el año 2020 el blog “Ecosistemas Digitales de Salud – El Imperativo del Sector” definió que los ecosistemas son como actores y escenarios que se interrelacionan para ofrecer mejores servicios o productos en el caso de los ecosistemas de salud para brindar una mejor atención médica.

Una problemática que los ecosistemas digitales en el sector salud han podido resolver es el del acúmulo de documentación médica y legal que genera un paciente, los ecosistemas digitales facilitan almacenar toda esta información y poder mantener estos antecedentes a lo largo del tiempo.

Por lo que es imprescindible contar con componentes integradores del desarrollo informático y tecnológico integrado a las redes de información y canalización médica, así como a los diferentes niveles de atención médica.

Ya es un hecho que cada paciente pueda tener su historia clínica electrónica en su dispositivo móvil u ordenador esto gracias a la vinculación con los ecosistemas digitales de salud.



Fig. 3. Entorno Digital. Tomado de [4].

En el sector salud la nueva infiltración de la tecnología y los ecosistemas digitales como ya hemos mencionado han generado una gran cantidad de ventajas, fundamentalmente desde el punto de vista de la atención integral de salud y el trabajo en equipo. Gestión eficiente mediante la eliminación o minimización de las fricciones clásicas de la integración clínico-administrativa.

En el mismo sentido, el Ecosistema de Salud Digital debe mantenerse centrado en el paciente [5] y tener la capacidad de:

- Atenciones integrales por teleconsulta, o de manera presencial.
- Consultas en de terreno de la atención primaria de salud.
- Prescripción digital de actividad nutricional y de ejercicios.
- Integración de hitos administrativos y de soporte financiero.
- Mayores actividades de Prevención y Promoción de salud.
- Una mejor adaptación del Proceso salud-enfermedad.

En la adaptación del sector salud y el uso de los ecosistemas digitales, los profesionales advierten no perder de vista el centro, el eje de toda esta interacción, de toda esta vinculación de las ciencias informáticas, del desarrollo tecnológico y el proceso salud-enfermedad que es el paciente. Por lo cual se han establecido principios rectores en la transformación digital del sector salud (véase Fig. 4).



Fig. 4. Principios Sobre la Transformación. Tomado de "El Economista".

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso y funciones de los ecosistemas digitales en el sector salud en el momento actual se ve facilitado por la combinación de empresas Biológicas y de la Información por lo que su desarrollo favorece con una perspectiva holística una mejoría en el proceso salud- enfermedad.

La salud Digital tiene como principal propósito el de actuar mejorando las ideas para la prevención y promoción de salud en la atención médica enfocado fundamentalmente hacia las enfermedades crónicas no transmisibles, así como desarrollar y personalizar cada vez más los medicamentos y consultas médicas.

El uso de las tecnologías móvil, de la internet, de las comunicaciones en general con un enfoque de ayuda y relación para mejorar la salud del hombre actual ha demostrado ser de vital importancia, esto reconocido por la OMS, y en los últimos años una mejor accesibilidad por parte de la población mundial por este desarrollo tecnológico ha mejorado la atención médica a nivel mundial.

En el año 2015 la ONU planteo una cartera de trabajo con 17 objetivos para el desarrollo sostenible del planeta y mejorar la salud mundial, esto la mayoría de los países se han enfrascado en el cumplimiento de los objetivos y esto gracias en gran medida al uso de las tecnologías digitales y el desarrollo de las informáticas y la comunicación.

Cada año todas las plataformas y tecnologías del desarrollo se van actualizando y saliendo a la luz nuevos equipos más personalizados y con mayores funciones, muchos de ellos enfocados a los diferentes pacientes con sus particularidades, así como también a los diferentes niveles de salud e instituciones.

A. La otra cara de la pandemia y los ecosistemas digitales de salud

Las diferentes Organizaciones de salud a nivel mundial afirman que "los servicios de salud se vieron afectados parcial o totalmente en muchos países por el Covid-19". En encuestas realizadas se demostró como muchos países por la covid 19 decidieron suspender consultas externas especializadas donde gran porcentaje de la

población quedaron sin seguimiento de enfermedades crónicas no transmisibles como la Hipertensión Arterial, la diabetes Mellitus, las Enfermedades cardiovasculares y muchas más todo esto para proteger a las personas del contagio del coronavirus, pero estas decisiones útiles en su momento de mayor contagio pandémico está viendo luego del control del virus a traído consecuencias no favorables para los pacientes portadores de dichas enfermedades que se quedaron sin una atención por casi más de 2 años.

Pero el uso de los ecosistemas digitales de salud fue una forma de paliar estos problemas de desatención a los enfermos no COVID en medio de las olas de contagios, la medicina digital ayudo y favoreció la elección de la mejor estrategia terapéutica para cada persona, basada en la evidencia y el empoderamiento de profesionales y pacientes, mejorando la sostenibilidad del sistema [6], [7], [8].

El uso de los ecosistemas digitales en el sector salud ha sido una decisión acertada por parte de las instituciones y sistemas de salud ya que sirven como una herramienta importante en la promoción y prevención de salud, así como en la personalización de los servicios médicos. Los ecosistemas digitales en la salud impulsan la transformación social, así como son una estrategia vanguardista en las diferentes políticas de salud a nivel mundial.

La Organización Mundial de la Salud luego de la crisis sanitaria mundial producto de la Covid 19 ha potencializado la Telemedicina como una herramienta asistencial importante para los servicios de salud. Siendo varias sus ventajas como puede verse en la Fig. 5.



Fig. 5. Ventajas de la Telemedicina.

B. El complemento perfecto de la terapia médica

En los últimos años se ha visto un desarrollo creciente en la medicina digital, múltiples son los productos terapéuticos digitales creados en beneficio de los pacientes, plataforma para realizar intervenciones sociales, consultas médicas digitales y dar una atención más integral al paciente. Este tipo de terapia digital le ofrece al paciente una forma innovadora de tratamiento además de ahorro en los costos

Para poder mantener este mercado de herramientas terapéuticas digitales en el sector salud es importante la vinculación de varios factores dentro de la sociedad para poder contextualizar de forma evidente esta mejora en la atención médica dentro de estos sectores o protagonistas se encuentran los diferentes niveles de la sociedad que van a formar el exosistema de la sociedad.

Una vertiente de la medicina actual es la medicina basada en la evidencia y esta especialidad se basa en toda la información recopilada de los pacientes y la enfermedad, los ecosistemas digitales y las plataformas digitales en el sector salud con grandes bases de datos con gran almacenamiento ha hecho posible el desarrollo de esta especialidad y por tanto de una atención médica más integral, así como mejorar la prevención y promoción de salud.

El incremento actual de las terapias digitales y los ecosistemas digitales en sentido general en el sector salud van a beneficiar a los pacientes brindándoles una atención médica de mejor calidad y además van a ser un apoyo para el personal médico y administrativo de los centros de salud.

El Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) desarrolla el Ecosistema Digital en Salud, proyecto estratégico mediante el cual se crean y alinean procesos informáticos que permitan establecer un punto de contacto único para trabajadores de la salud y administrativos, a fin de brindar atención más ágil y eficiente [11], [12].

IV. CONCLUSIONES

El sector salud a nivel mundial en tiempos actuales se encuentra enfrentando grandes desafíos como es el envejecimiento de la población mundial y por tanto una elevada prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles, así también los grandes mercados digitales y el desarrollo digital imparables es un reto para el sector salud. Las organizaciones de salud deben de crear estrategias para afrontar los diferentes desafíos que el desarrollo digital que puede provocar una mejora en el trabajo, pero también problemas en la atención y organización si la misma no se actualiza y fortalece a la par del mundo digital. Las tecnologías mejoran muchas funciones en la atención médica, así como permite personalizar la tarea asistencial pero a la vez la atención médica convencional se pierde y con ello aparecen otros factores que pueden ir en detrimento de la atención del paciente si no se tienen encuentran las ventajas y desventajas de los ecosistemas digitales y la evolución de la industria digital. Cada empresa, cada institución, cada organización de salud trabaja y colabora entre si para evolucionar y mejorar la atención médica a través de estas nuevas dinámicas de asistencia médica y así presentar una mejor calidad.

El uso adecuado y activo de los ecosistemas digitales en el sector salud depende en gran medida en la aceptación de la población y de los actores tradicionales de este sector por lo cual la vinculación del desarrollo digital, la evolución de las ciencias informáticas y comunicaciones no pueden dejar a un lado la esencia, el objetivo principal, que es el paciente, tratando de mejorar la atención médica haciendo esta más efectiva, más duradera e integral. No debe este vínculo entre la tecnología y el sector salud ser una herramienta para aumentar los costos, para enriquecer a las grandes empresas del sector digital y de comunicaciones.

Todos los beneficios que trae este vínculo deben ser para la mejora de la calidad de la atención médica. A medida que evolucionan las tecnologías debe de evolucionar la mente y el corazón del hombre actual en la búsqueda de un futuro mejor para todo el planeta.

La salud digital se valorará y adoptará si es accesible y facilita el acceso equitativo y universal a servicios sanitarios de calidad; si aumenta la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de salud ofreciendo una asistencia de calidad, asequible y equitativa, y si fortalece y amplía la promoción de la salud y los servicios de prevención, diagnóstico, tratamiento, rehabilitación y cuidados paliativos, antes, durante y después de una epidemia o una pandemia, en un sistema que respete la privacidad y la seguridad de la información sobre la salud de los pacientes [13].

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México.

REFERENCIAS

- 8
- [1] N. Ramírez, “Día de Internet”, *Revista Neo*, 2022. <https://www.revistaneo.com/index.php/articles/2022/05/17/dia-de-internet-que-son-los-ecosistemas-digitales-de-salud> (accessed Jun. 22, 2022).
 - [2] Blog Post ES, “Componentes de un Ecosistema de Salud Digital”, *Tec Salud*, 2022. <http://www.tecsalud.io/2022/02/04/componentes-de-un-ecosistema-de-salud-digital> (accessed Sept. 22, 2022).
 - [3] Fundación Carlos Slim, *Salud Digital: Un concepto que revoluciona el campo de la salud*, 2022. <https://saluddigital.com/es/big-data/salud-digital-un-concepto-que-revoluciona-el-campo-de-la-salud> (accessed Sept. 20, 2022).
 - [4] L. E. Del Pino, “Ecosistemas Digitales en Salud”, *Consultor Salud*, 2022. <https://consultorsalud.com/ecosistemas-digitales-en-salud> (accessed July. 19, 2022).
 - [5] P. Ortega, “Se requiere un ecosistema de salud digital enfocado en la experiencia del paciente”, *El Economista*, 2022. <https://www.eleconomista.com.mx/tecnologia/Se-requiere-un-ecosistema-de-salud-digital-enfocado-en-la-experiencia-del-paciente-20220507-0018.html> (accessed Oct. 12, 2022).
 - [6] S. Bayona-Oré, S. Azorsa-Salazar, F. Jiménez, J. Vásquez, “Tecnología, Innovación y Emprendimiento en el Sector Salud”, *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Información*, no. E47, 2022, pp. 472-483. (accessed Agos. 30, 2022).
 - [7] F. Guillen, M. A. Trujano, “Enfermedades cardiovasculares en México durante la pandemia una “pandemia paralela”, *Serendipia Digital*, 2022. <https://serendipia.digital/victimas-paralelas/enfermedades-cardiovasculares-en-mexico-durante-la-pandemia> (accessed Oct. 11, 2022).
 - [8] F. Reyes, “Cuáles son las evidencias del daño colateral del covid-19 en la salud de los argentinos”, *Infobae*, 2022. <https://www.infobae.com/salud/2020/07/07/cuales-son-las-evidencias-del-dano-colateral-del-covid-19-en-la-salud-de-los-argentinos> (accessed Jun. 11, 2022).
 - [9] B. Conde Saavedra, “Ecosistema Digital: La clave para el éxito de tu empresa”, *Zoho Blog*, 2022. <https://www.zoho.com/blog/es-xl/one/ecosistema-digital-clave-para-exito-empresa.html> (accessed Oct. 11, 2022).
 - [10] J. L. Santibáñez, “Ecosistema Digital ¿Qué es y cómo usarlo?”, *Data Driven Marketing*, 2022. <https://limaretail.com/marketing-digital/ecosistema-digital> (accessed July. 12, 2022).
 - [11] IMSS, “Acercando el IMSS al Ciudadano. Con el Ecosistema Digital en Salud, IMSS trabaja en automatizar sus procesos médicos para ofrecer atención más ágil y eficiente”, *Gobierno de México*, 2022. <https://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/202207/362> (accessed Jun. 19, 2022).
 - [12] Healthnology News, “El Ecosistema Digital en Salud y la Automatización de Procesos”, 2022. <https://www.healthnology.es/el-ecosistema-digital-en-salud-y-la-automatizacion-de-procesos> (accessed Oct. 12, 2022).
 - [13] D. León, “Ecosistemas Digitales de Salud y Bienestar, el Imperativo del Sector”, *Building a Better Working World*, 2022. https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/es_co/webcast/ecosistemas-digitales-de-la-salud.pdf (accessed Sept. 20, 2022).

Rediseño de una maquina automatizada, extrusora de plástico fundido, utilizando botellas PET para la fabricación de filamentos para impresoras 3D

Redesign of an automated machine, cast plastic extruder, using PET bottles for the manufacture of filaments for 3D printers

Luis Humberto **López-Flores**¹, Andrés **Garcés Chávez**²,
Claudio **López-García**³, Luis Manuel **Valverde-Cedillo**⁴

Tecnológico de Estudios Superiores de Chalco, MÉXICO

¹ <https://orcid.org/0000-0003-3730-000X> | luis_lf@tesch.edu.mx

² <https://orcid.org/0000-0003-4079-2930> | andres_gc@tesch.edu.mx

³ <https://orcid.org/0000-0002-8361-8249> | claudio_lg@tesch.edu.mx

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-1204-883X> | luis_vc@tesch.edu.mx

Recibido 02-12-2022, aceptado 15-02-2023.

Resumen

El presente trabajo está enfocado en la fabricación de filamento para impresoras 3D a base de botellas de PET. Pasando por un proceso de trituración para generar hojuela, posteriormente se fundirá, depositándola en el extrusor, para después empujar el plástico fundido hacia las boquillas con un diámetro de 1.75 mm, al final de la etapa pasaran por ventiladores de enfriamiento permitiendo así un mejor endurecimiento del producto al momento de realizar el embobinado del mismo; logrando de esta forma unir en una sola máquina el proceso completo de producción de filamento para impresoras 3D. Incorporándonos en el mercado de filamento para impresoras 3D y generando con ello un enfoque más positivo para la sociedad al igual que mejorar nuestro entorno ecológico.

Palabras clave: extrusión, trituración, PET, filamento, impresoras 3D.

Abstract

This work is focused on the manufacture of filament for 3D printers based on PET bottles. Going through a crushing process to generate flake, then it will be melted by depositing it in the extruder obtaining a casting process to then push the molten plastic into the nozzles with a previously established diameter, at the end of the stage will go through cooling fans allowing a better hardening of the product at the time of winding the same; thus achieving to unite in a single machine the entire process of production of filament for 3D printers. In this way we intend to join the market of the 3D printer industry and thus generating a more positive approach to society as well as improving our ecological environment.

Index terms: extrusion, trituration, PET, filament, 3D printers.

I. INTRODUCCIÓN

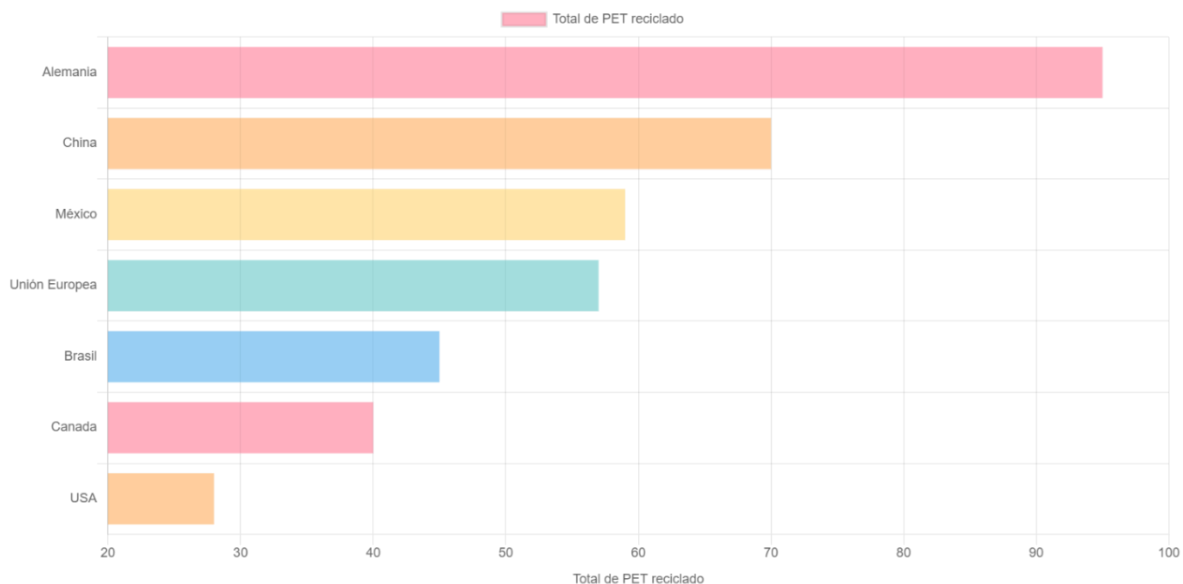
Como parte de la historia de los poliésteres termoplásticos, grupo al que pertenece el PET, se cuenta con el trabajo realizado por Carothers en el año de 1929. Los primeros experimentos realizados con los poliésteres pro-sintetizados se formaron a partir de ácido adípico y etilenglicol.

El químico Wallace Hume Carothers estudio primeramente los polímeros alifáticos que tienen un bajo punto de fusión y estos son solubles en disolventes orgánicos convencionales, de tales experimentos no hubo éxito a nivel industrial. Sin embargo, Wallace Carothers concentro más su atención hacia las poliamidas, teniendo como resultado (el PET).

La principal utilización del PET en México es en botellas de refresco de diferentes presentaciones (teniendo más del 50 por ciento del total producido), seguido del agua embotellada (con un 17 por ciento). Las diferentes marcas de empresas han creado publicidad a lo largo de los años, esto combinado con la falta de información y cultura de reciclaje, han generado que en México y el mundo se consuman refrescos y bebidas en botellas desechables como parte de un hábito natural de consumo. Las empresas que generan estas botellas participan muy poco en el reciclado de las mismas.

Hoy en día la recolección de botellas PET ha aumentado, permitiendo así dar otro uso a las botellas y otros plásticos. México encabeza la lista como líder en América en recolección y reciclaje PET.

TABLA 1
MÉXICO LÍDER EN AMÉRICA EN RECOLECCIÓN Y RECICLAJE PET
FUENTE: SEMARNAT 2020, ECOCE 2021 [1]



II. METODOLOGÍA

Este proyecto surge con el objetivo de brindar soluciones a uno o varios problemas y satisfacer diversas necesidades, remplazando tecnología obsoleta, optimizando procesos existentes, buscando mejorar su productividad y desarrollando productos capaces de reemplazar a otros por un precio más accesible y de mejor

calidad, con esto se pretende aprovechar oportunidades de negocios en el mercado de filamento PET para impresoras 3D, antes de iniciar el proyecto fueron consideradas algunas etapas de elaboración para este:

- Planificación: La planificación da comienzo desde el objetivo e hipótesis: rediseñar una máquina recicladora de botellas PET para la creación de filamento para impresoras 3D, así contribuimos a reducir los desechos sólidos (botellas PET) del 2%, en el Estado de México.
- Boceto inicial de la máquina: paso posterior al objetivo, es realizar un boceto inicial de la estructura que llevará la máquina, los tipos de mecanismos, y dispositivos eléctricos para su automatización. Este boceto será utilizado para realizar un inventario del material que utilizaremos para la elaboración del proyecto (véase Fig. 1).
- En el diseño de máquina en software de simulación: se realiza un diseño de máquina en software basándose en el boceto de inicio del proyecto, este software nos permitirá el armado de mecanismos, y la simulación del funcionamiento de estos. Se utilizará software SolidWorks. Con la utilización de este software se realizará diagrama explosivo para identificar cada parte y ubicación de las que está compuesta nuestra máquina.
- Para la elaboración de manuales: se realizará la elaboración de un manual de funcionamiento y un manual de mantenimiento en los cuales se detalla el funcionamiento de nuestra máquina y las acciones que se tienen que llevar a cabo para realizar un buen mantenimiento a la máquina respectivamente, junto con la opción de un mejoramiento a futuro.

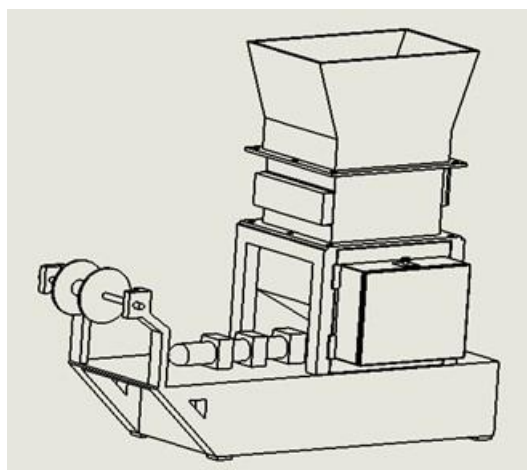


Fig. 1. Boceto inicial de la máquina.

Como proyecto de ingeniería se contempla que a futuro y con el avance de la tecnología se puedan implementar mejoras en la máquina permitiendo así mejorar su eficiencia en las cuestiones de producción y mantenimiento generando así futuras investigaciones e implementación de nuevos conocimientos, para la elaboración de este proyecto se utilizarán fundamentos de ingeniería que nos permitirán tener un diseño de máquina que cumpla con la normatividad vigente nacional e internacional, las necesidades del cliente, y los tiempos de productividad

III. CONSTRUCCIÓN

Tomando en cuenta el realizar un listado de materiales y conociendo el funcionamiento y diseño de la máquina en simulación, se realizará un inventario de materiales de inicio para comenzar el armado de la máquina. A continuación, se mencionan los materiales básicos considerados (véase Fig. 2):

1. PTR 1.25 in, C-18 acero 1018 (estructura).
2. Motorreductor SEW euro Drive de 1 HP. (trituradora)
3. Manorreductor Transtecno 0.75 HP (extrusor)
4. Lamina de acero 1020, de dimensiones 2m x 2m.
5. Tablero de control.
 - a. Botoneras de paro y arranque.
 - b. Balizas de indicación de accionamiento.
 - c. Interruptor termomagnético.
 - d. Seccionador de voltaje
 - e. Contactor de 220 Volts.
 - f. Variador de frecuencia GPD 505 MagneTek
 - g. Pirómetro y termopar 127 volts
6. Eje de acero inoxidable 316L, 1 in diámetro.
7. Extrusor de acero AISI 1020, 1.5 in diámetro, 15.75 in longitud.
8. Tolva de acero C-18, AISI 1020.
9. Contenedor de hojuela PET, acero AISI 1020, C-18.
10. Caja de molienda.
 - a. Placa de acero AISI 1020, 0.3125 in grosor
 - b. Cuchillas de acero AISI 1020, 0.1875 in grosor
 - c. Separadores de acero AISI 1020, 0.25 grosor
 - d. Criba de acero AISI 1020, 0.1875 grosor, barreno de 1.5 in

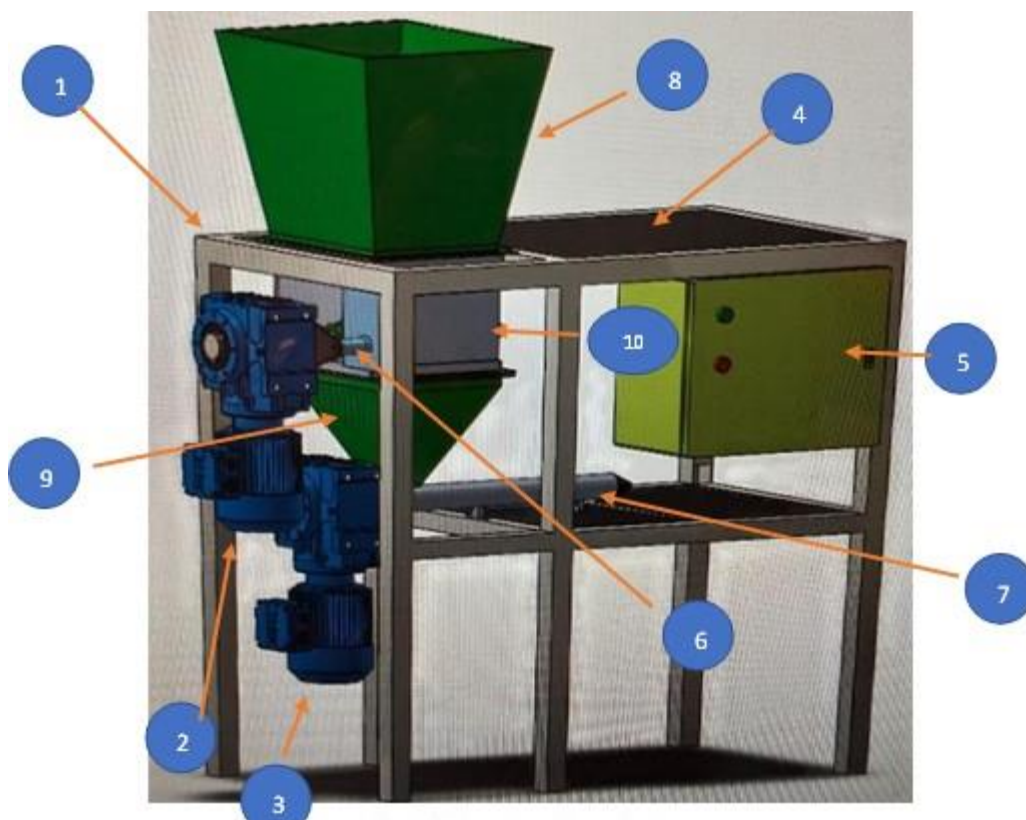


Fig. 2. Estructura de la máquina.

IV. RESULTADOS

Se realiza una validación de elementos que sufren un esfuerzo de tensión en la máquina, (Véase Fig. 3)

- 1. Eje motriz de 1 in, acero inoxidable 316L
- 2. Eje inducido 1 in, de acero AISI 1020
- 3. Cuchillas 0.1875 in de grosor en acero AISI 1020

Se realizó un estudio de esfuerzo de tensión en los ejes y un estudio de esfuerzo de torsión en las cuchillas. Se utilizó el software Solid Works 2019 módulo de simulación, análisis estático de torsión.

5

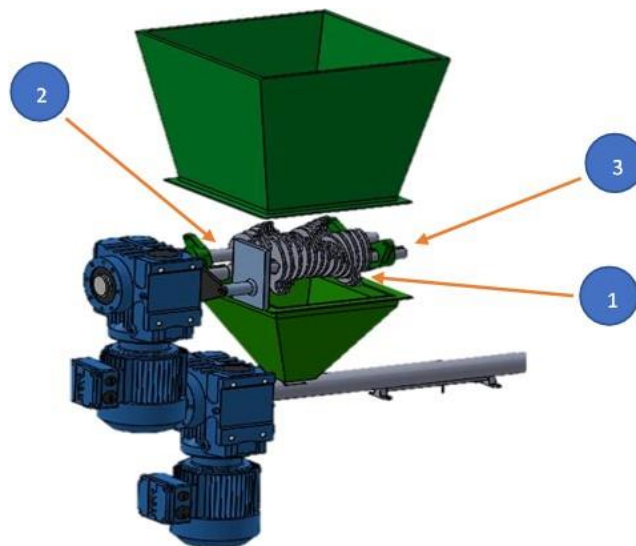


Fig. 3. Elementos de la máquina que sufren esfuerzo de tensión.

Para el elemento del eje motriz se realiza un análisis de Von Mises, con el software Solid Works 2019, módulo de simulación; análisis estático. Este análisis se realizó para conocer el momento y fuerza máximos que puede soportar el material de flechas y cuchillas, con base en esta teoría, podemos conocer dichos valores, con la cual podremos confirmar la selección de los materiales que se utilizaron. Esta validación es para conocer y validar la selección del material para el eje motriz, que es de acero inoxidable 316L. Con base en la tabla de propiedades mecánicas del acero inoxidable, según ASTM A240 y ASME SA-240, este acero tiene un límite elástico de 170 MPa. (véase Tabla 2).

TABLA 2
INFORMACIÓN DE PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE 316L. ALEACIÓN 316-317 CHILEXPO

Propiedad	Propiedades Mecánicas Mínimas Requeridas Según ASTM A240 y ASME SA-240		
	316	316L	317L
Límite Elástico 0.2% Desplazamiento psi (MPa)	30.000 (205)	25.000 (170)	30.000 (205)
Resistencia a la Tracción psi (MPa)	75.000 (515)	70.000 (485)	75.000 (515)
Porcentaje de Elongación en 2" o 51 mm.	40.0	40.0	40.0
Dureza Max. Brinell (RB)	217 (95)	217 (95)	217 (95)

Las condiciones iniciales para el eje motriz son los siguientes (véase Fig.4).

- Se colocan los puntos de apoyo en las zonas marcadas con flechas verdes, ya que son las ubicaciones de la posición de las chumaceras en la caja de molienda.
- Se le aplica una fuerza a lo largo del mismo de 980.67 Pascales (flechas color morado).

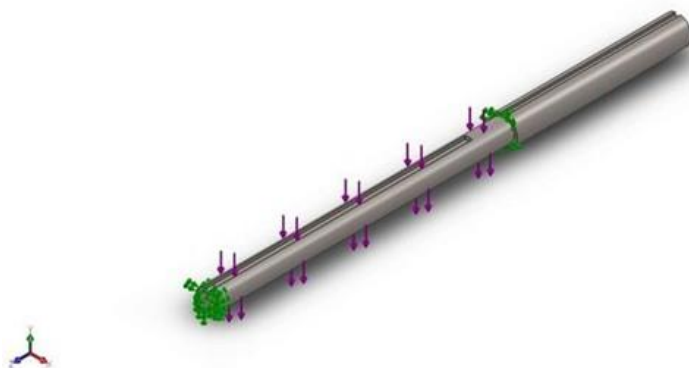


Fig. 4. Condiciones iniciales del eje motriz.

La teoría de fallo realizada en este software nos indica que el material dúctil acero inoxidable 316L es el correcto para la utilización de eje motriz.

Como resultados de este análisis realizado por el software Solid Works 2019, módulo de simulación, análisis estático, nos muestra (véase Fig.5):

- Esfuerzo máximo de tensión de 83.38 MPa. Mostrado de color rojo en la gráfica.
- Límite elástico máximo de 137.89 MPa. Mostrado en la flecha parte inferior de la gráfica.

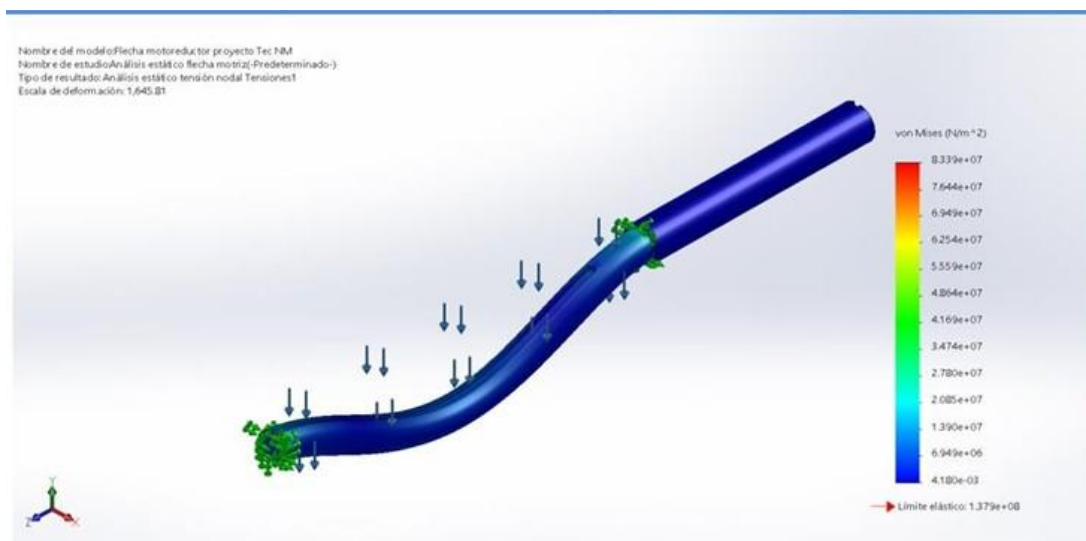


Fig. 5. Validación del elemento eje por Von Mises.

Este material es el adecuado ya que con base en los resultados obtenidos nos muestra que a lo largo del eje no se llegaría en ningún momento a su límite elástico, ya que el resultado arrojado por la simulación es de 137.9 MPa y comparando con la tabla 2 de información de propiedades del acero inoxidable 316L el límite elástico del acero inoxidable es de 170 MPa, (véase Tabla 2). Los resultados nos ayudan a saber cuál es el límite elástico del material con la carga aplicada, así como, en que zonas del material podría sufrir deformaciones o estar cerca del límite elástico teórico del material.

En cuestiones del elemento cuchillas se hace un análisis de esfuerzos de torsión en la sección que realizará el corte de las botellas, considerando que es la zona que estará bajo los esfuerzos constantes de trituración (véase Fig. 3), las consideraciones que se tomaron en cuenta fueron las siguientes:

- A. Material de la cuchilla: acero AISI 1020.
- B. Dimensiones de la cuchilla: longitud 4.6875 in, grosor 0.1875 in, barreno central 1 in
- C. Sujeción en la parte central de la cuchilla.
- D. Limite elástico acero AISI 1020: 343 MPa
- E. Aplicación de fuerza en extremos de la cuchilla de 980.67 Pascales

TABLA 3
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1020, CIA.GENERAL DE ACEROS S.A

PROPIEDADES MECÁNICAS					
Estado de suministro	Resistencia a la tracción MPa	Límite elástico MPa	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell aprox.
Laminado en caliente	441	196	25	45	140 / 180
Normalizado	490 - 588	343	30	55	150
Recocido	441 - 539	294	35	60	130 / 150
Calibrado	539 - 686	441	10	35	180 / 220
Cementado, templado y rev.	686 - 833	441	15	45	-----

Las condiciones iniciales para la cuchilla son los siguientes (véase Fig.6).

- Los puntos de apoyo con los que cuenta el elemento están posicionados en las flechas de color verde
- Se le aplica un esfuerzo máximo de torsión en los extremos de la cuchilla de 980.67 Pascales (flechas color morado).

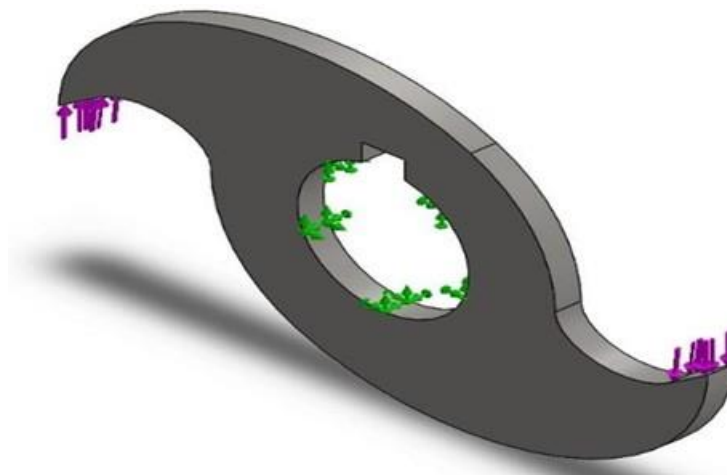


Fig. 6. Condiciones iniciales de la cuchilla de trituradora.

Como resultados del estudio arrojado por el Software Solid Works 2019, módulo de simulación, análisis estático de torsión (véase Fig.7):

- Esfuerzo máximo de tensión de 12.89 MPa. Visualizado en la parte roja de la gráfica.
- Limite elástico máximo 351 MPa. Visualizado con la flecha en la parte inferior de la gráfica.

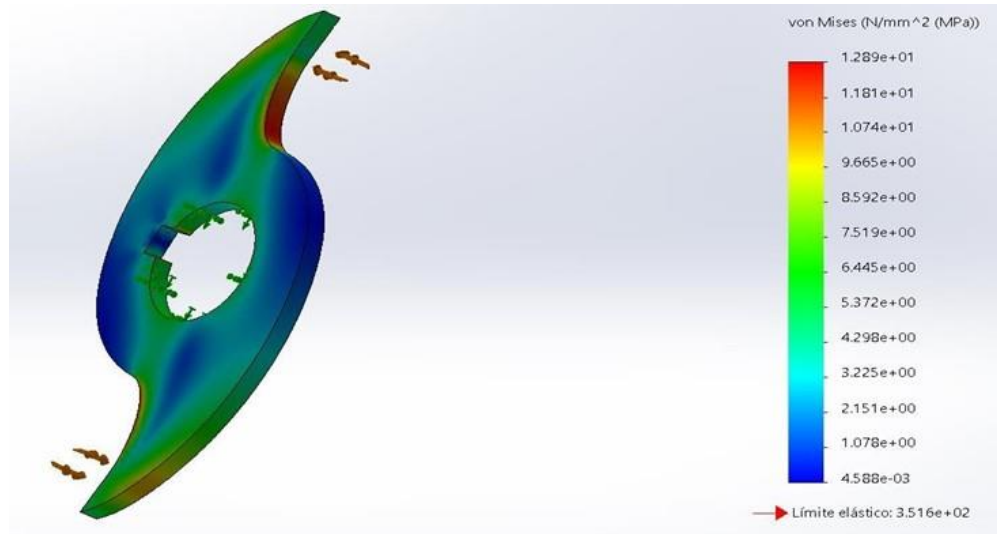


Fig. 7. Validación del elemento cuchilla.

Los resultados obtenidos para el elemento cuchilla nos indican que al someter a la cuchilla a un esfuerzo de torsión de 980.67 Pascales en la parte de corte de la cuchilla nos da como resultado un límite elástico de 351 MPa, este resultado se iguala con el límite elástico preestablecido por la tabla de propiedades mecánicas del acero AISI 1020, que es de 343 MPa, (véase Tabla 3): Tomando en cuenta los resultados, el material esta en un punto vulnerable de operación, lo cual para su implementación se considera tratar el elemento con un proceso térmico, el proceso térmico que se realizara a dicho elemento sería un templado martensítico, este proceso consiste en calentar el material llevándolo a una temperatura elevada para posteriormente realizar un enfriamiento rápido dentro de un aceite, este proceso nos permitirá tener un aumento significativo en las propiedades mecánicas del acero. Para un análisis futuro se tendrá que parametrizar los nuevos datos del elemento permitiendo así que el análisis se realice tomando en cuenta los datos reales.

En la etapa de extrusor se realiza un análisis térmico con ayuda del software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico.

En el elemento barril o cañón de extrusor, que está diseñado con un material de acero AISI 1020, se aplicó una temperatura de 260 °C en la parte exterior del barril, que es la ubicación de contacto de las resistencias cerámicas de 660 W, (véase Fig.8).

Las condiciones principales que se consideraron para esta prueba fueron:

- A. Barril de extrusor de acero AISI 1020, longitud de 45 cm, diámetro de 1.25 in
- B. Conductividad térmica del acero AISI 1020 de 51.9 W/(m*k)
- C. 4 resistencias cerámicas de 660 watts, diámetro 1.25
- D. Elevación uniforme de temperatura a lo largo del extrusor a una temperatura de 260°C

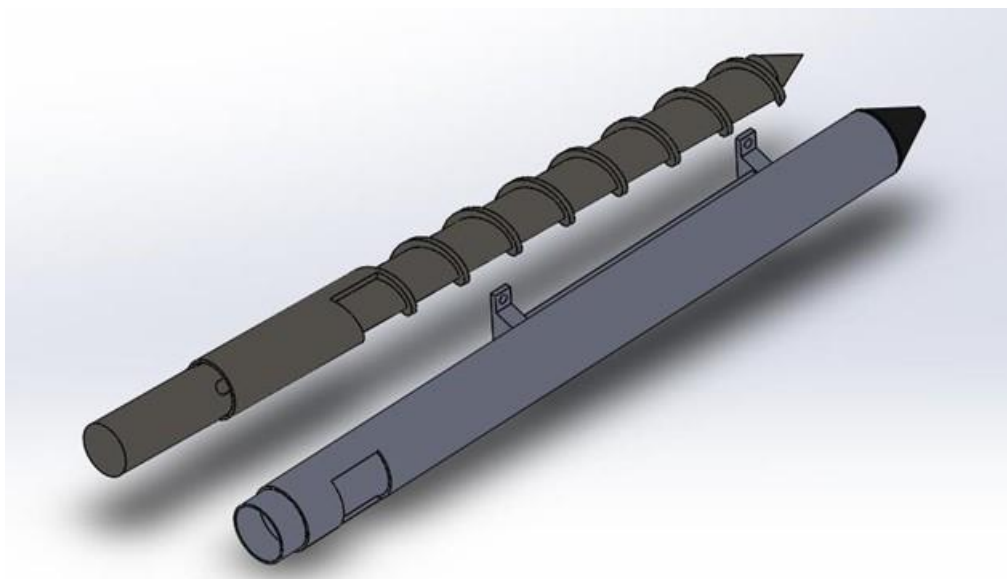


Fig. 8. Vista explosionada de extrusor.

Como resultado una temperatura máxima en el barril de 260 °C, mostrada en la gráfica del software con color rojo, (véase Fig.9). mostrando que el material de acero AISI 1020, no tiene una deformación al calentamiento, la temperatura de fusión del acero AISI 1020 es de: 1400°C, (véase Tabla 4), validando que el material seleccionado para este elemento es el adecuado debido a los propiedades físicas que este posee y a la aplicación de uso pensada, este deberá contar con una protección exterior que recubra lo largo del extrusor para evitar el contacto por el usuario, ya que este elemento se encuentra a una temperatura que puede ocasionar quemaduras a las personas que estén cerca del extrusor.

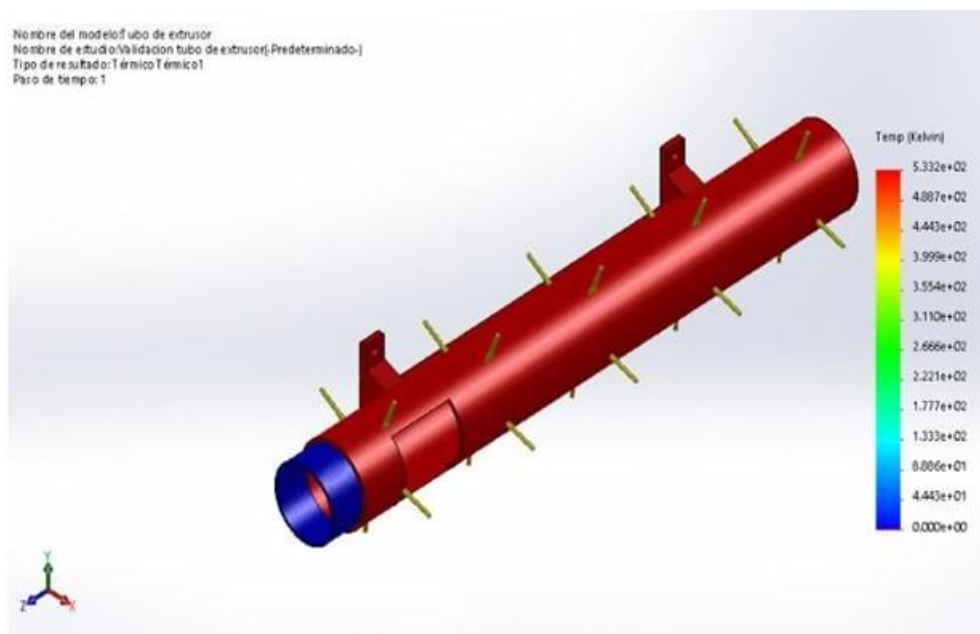


Fig. 9. Resultado de validación de temperatura para el barril de extrusión.

TABLA 4
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1020, CIA.GENERAL DE ACEROS S.A

METALES	PUNTO DE FUSION
Estaño	240°C (450°F)
Plomo	340°C (650°F)
Cinc	420°C (787°F)
Aluminio	620°-650°C (1150°-1200°F)
Bronce	880°-920°C (1620°-1680°F)
Latón	930°-980°C (1700°-1800°F)
Plata	960°C (1760°F)
Cobre	1050°C (1980°F)
Hierro fundido	1220°C (2250°F)
Metal monel	1340°C (2450°F)
Acero de alto carbono	1370°C (2500°F)
Acero medio para carbono	1430°C (2600°F)
Acero inoxidable	1430°C (2600°F)
Níquel	1450°C (2640°F)
Acero de bajo carbono	1510°C (2750°F)
Hierro forjado	1593°C (2900°F)
Tungsteno	3396°C (6170°F)

Para la validación de temperatura del elemento husillo se tiene en consideración aplicar la temperatura máxima en la longitud total de la pieza (véase Fig. 10), ya que será el medio de transportación de la hojuela fundida, este elemento cuenta con las siguientes características:

- Material: acero AISI 1020.
- Conductividad térmica del acero AISI 1020 de 51.9 W/(m*k)
- Se aplicará temperatura de manera uniforme de 260°C.

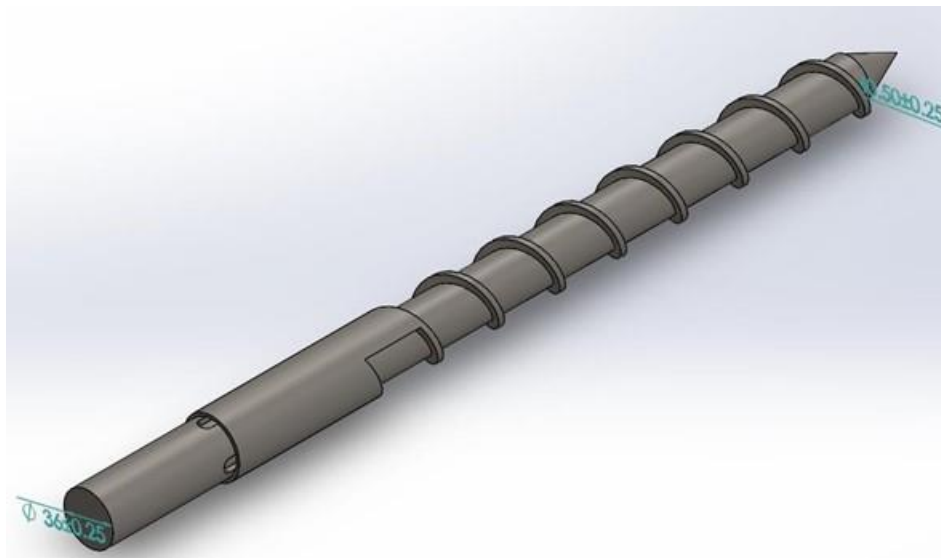


Fig. 10. Elemento husillo.

Los resultados obtenidos en el análisis realizado con el software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico, nos indican una temperatura máxima en el cuerpo del husillo de 260 °C, mostrada en la parte roja de la gráfica (véase Fig. 11), comprobando que el material seleccionado, acero AISI 1020 es el adecuado para su utilización, ya que no existe deformación en el material, al no superar el punto de fusión del acero AISI 1020. (véase Tabla 4).

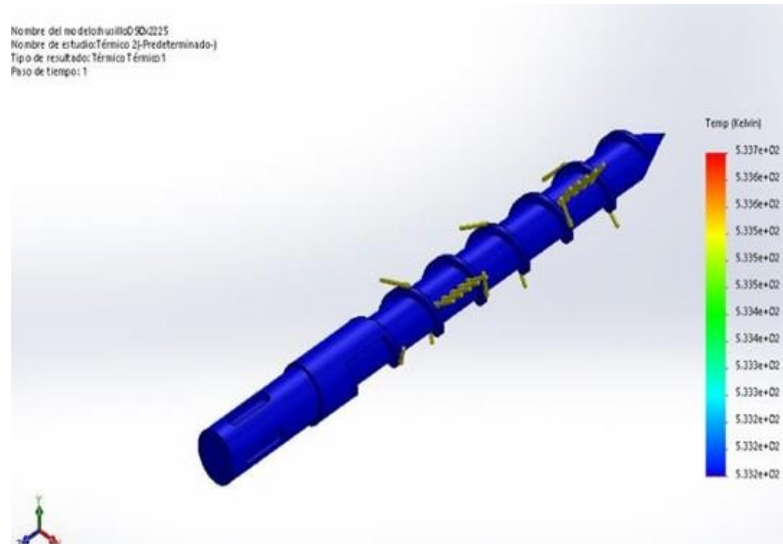


Fig. 11. Validación de temperatura al elemento husillo.

En el elemento boquilla de extrusión, se realizó un análisis de temperatura en la parte interior de la boquilla, utilizando el software Solid Works 2019 módulo de simulación avanzada, térmico, (véase Fig. 12), tomando en cuenta que será el medio de expulsión de la hojuela fundida en una boquilla de diámetro de 1.75 mm. Las consideraciones que se tomaron en cuenta son las siguientes:

- I. Material de fabricación: Acero AISI 1020.
- II. Conductividad térmica de 52 W/ (m.K).
- III. Temperatura aplicada 260°C.

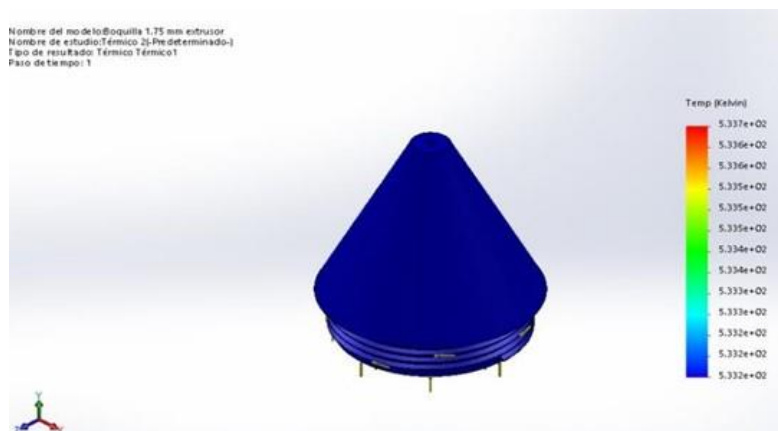


Fig. 12. Validación de temperatura para la boquilla de extrusión.

Los resultados obtenidos indican que la temperatura máxima es de 260 °C, observada en la parte roja de la gráfica, validando que el material de acero AISI 1020, con el que se fabricó la boquilla es el adecuado para la función de extrusor.

V. CONCLUSIONES

Los análisis que se realizaron en este artículo con el software Solid Works nos proporcionan datos e información que utilizaremos para conocer el comportamiento de los materiales que se pretenden utilizar en la etapa de trituración y extrusión de este proyecto. Analizando los resultados obtenidos, después de someter una simulación de esfuerzos de torsión inducidos al eje motriz y cuchillas, de material acero AISI 1020, se tiene un funcionamiento correcto de la etapa de trituración ya que existe una deformación permisible, que no sobrepasa el límite elástico del material. Como mejora del elemento eje y cuchilla, se sugiere cambiar la geometría de la parte central para evitar concentración de esfuerzos en el cuñero y prevenir un deslizamiento. Para un análisis futuro se parametrizará los nuevos datos.

En el extrusor, la simulación de aumento de temperatura en barril, boquilla y husillo nos indica que el material de fabricación del extrusor, acero AISI 1020, funciona correctamente en comparación con otros aceros en su composición química, como el AISI 1018 que contiene un 0.18% de carbono y hierro contra 0.20% del acero AISI 1020. Esta diferencia en la simulación nos muestra menos cambios estructurales por esfuerzos térmicos, ya que la elevación de temperatura no afecta la composición del material, por lo tanto, existirá un menor desgaste al extrudir plástico fundido.

REFERENCIAS

- [1] CP Plásticos, *CP Plásticos*, 2022. <http://www.cpplasticos.mx/>
- [2] SolidWorks, "Criterio de máxima tensión de Von Mises – 2018", Ayuda de SolidWorks, 2022. https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/r_maximum_von_mises_stress_criterion.htm
- [3] Acero AISI/SAE 1020, 2022. (2020, abril 18). Cía. General de Aceros S.A. <https://www.cga.com.co/producto/acero-aisi-sae-1020/>
- [4] Nexeo Plastics, *Propiedades térmicas y mecánicas del PET reciclado y sus mezclas*, 2007. <https://www.plastico.com/es/noticias/propiedades-termicas-y-mecanicas-del-pet-reciclado-y-sus-mezclas>
- [5] A. Flores, "Extrusor de polímeros, ¿qué es y cómo funciona?", +Ciencia, no. 22, 2022. <https://www.anahuac.mx/mexico/noticias/Extrusor-de-polimeros-que-es-y-como-funciona>
- [6] Tractermia, *Templado del Acero*, 2022. <https://www.tractermia.com/templado-del-acero/>
- [7] F. Delgado, *Acero inoxidable. Sus propiedades y características*, 2019. <https://www.masterlogistica.es/acero-inoxidable-sus-propiedades-y-caracteristicas/>
- [8] M. Heat, "Resistências elétricas para extrusoras", *Maxpolheaters*. 2022. <https://www.maxpolheaters.com/blog-es/Variedad-en-las-resistencias-el%C3%A9ctricas-para-extrusoras-55.html>
- [9] Cía. General de Aceros, *Acero Grado Ingeniería*, 2022. <https://www.cga.com.co/>
- [10] Yaskawa America, *GPD 505 Manual técnico*, Magnetek, 2022. <https://www.yaskawa.com/downloads/search-index/details?showType=details&docnum=TM4505>
- [11] ChileExpo, *Aleación 316-317*, 2022. <https://www.chileexpo.com/wp-content/uploads/2019/06/316-317.pdf>
- [12] E. Hoffman, *Manual del taller para estudiantes y operarios*, México: Limusa, 2006.
- [13] Materiales Industriales 3IV, *Fundición*, 2022. <https://sites.google.com/site/materialesindustriales3iv/home/fundicion>
- [14] R. Budynas, J. Keith, *Diseño de Ingeniería mecánica*, 8ª ed., México: Mc Graw Hill, 2010.
- [15] Y. A. Cengel, M. A. Boles, *Termodinámica*, 7ª ed., México: Mc Graw Hill, 2010.
- [16] Norma Oficial Mexicana, *NOM-004-STPS-1999, Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo*, México, 1999.
- [17] The Food Tech, *Recicla Estado de México sólo 2% del PET que consume*, 2011. <https://thefoodtech.com/historico/recicla-estado-de-mexico-solo-2-del-pet-que-consume/>
- [18] Corpmetal, *Acero 1018 y el 1020 y sus características*, 2022. <https://corpmetales.com/acero-1018-1020-caracteristicas/>

Aplicaciones de congruencias módulo m y ecuaciones diofantinas

Congruences Module m and its Applications and Diophantine Equations

Mario Antonio **Ramírez Flores**¹
Sergio Iván **González Medina**²

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

¹ mramirezf@ipn.mx

² sigonzalezm@ipn.mx

Recibido 07-07-2022, aceptado 10-01-2023.

Resumen

Se desarrolla un método de análisis de dos tópicos de la teoría de los números: las congruencias modulo m y las ecuaciones diofantinas; las primeras referidas a la divisibilidad entre números, y las segundas a la solución de ecuaciones con coeficientes enteros con solución en números (enteros). Se estudian los números primos y la descomposición de un numero entero en factores primos, a su vez, el conocimiento de divisibilidad y sus propiedades. Asimismo, la aplicación de ambos temas para el encriptado de información en un ejemplo de una palabra con 10 (diez) letras no repetidas, que da lugar a una frase ininteligible, mismo que puede usarse como código de seguridad.

Palabras clave: Teoría de los números, congruencias, ecuaciones diofantinas, encriptado de información.

Abstract

A method of analysis of two topics of the theory of numbers, the congruences modulo m and the Diophantine equations, is developed; the first referred to the divisibility between numbers, and the second to the solution of equations with integer coefficients with solutions in (integer) numbers. Prime numbers and the decomposition of an integer into prime factors are studied, as well as the knowledge of divisibility and its properties. Likewise, the application of both topics for the encryption of information in an example of a word with 10 (ten) non-repeated letters, which gives rise to an unintelligible phrase, which can be used as a security code.

Index terms: Number theory, congruence, Diophantine equations, information encryption.

I. INTRODUCCIÓN

Una pregunta que resulta, además de inocente, desafiante, consiste en cuestionar ¿Qué es un número? La respuesta a semejante inocencia sencillamente es compleja, pues es un concepto fundamental en matemáticas. El concepto de número nació como abstracción de propiedades de conjuntos de objetos con los que el hombre encontraba en su diario quehacer, y ha servido para caracterizar cuantitativamente objetos y procesos. Para proceder a entender, que no significa responder lo incontestable, se recurrirá a la llamada Teoría de los Números, o como decía C.F. Gauss: La Reyna de las Matemáticas.

La teoría de números es la rama de las matemáticas que estudia las propiedades de los números, en particular de los enteros. Gran parte del siglo XIX en la búsqueda del concepto de número, y partiendo de los naturales (\mathbb{N}), se obtuvieron clases más amplias y complicadas de números. Se tenía la idea de que un número natural era algo, simple y transparente, que podía ser reducido a un concepto más sencillo. Sin embargo, las cosas se complicaron. En el afán de contextualizar una respuesta alterna que ayude a formar la impresión de número y de sus aplicaciones, se muestra una caracterización de los naturales:

$$\mathbb{N} = \{1, 2, 3, \dots\}, \quad (1)$$

cómo se observa están ordenados en una sucesión. Algunas de sus propiedades son:

- i) Inicia en un elemento especial, el 0.
- ii) La sucesión no termina ni se ramifica.
- iii) La sucesión no se cierra sobre sí misma.
- iv) La sucesión no tiene puntos de confluencia (ningún elemento sigue a dos distintos).
- v) No hay números intercalados.

La gama de posibilidades para combinar elementos de este conjunto es *grande*, por ende, sus aplicaciones. La razón de este artículo es precisamente indicar algunas aplicaciones de la *teoría* en diferentes áreas, de manera particular se trata, por ejemplo, la *encriptación de información* que además de aumentar la seguridad en la transferencia de esta reduce la posibilidad de ser sustraída.

Haciendo uso de conceptos propios de la teoría de los números para tal fin, se tienen criterios como *la divisibilidad, ecuaciones diofantinas, congruencias modulo m , entre otros*.

A. Los números enteros

En lo sucesivo se considera el conjunto de los números enteros, denotados con la letra mayúscula \mathbb{Z} . En este conjunto aparecen los números $0, \pm 1, \pm 2, \dots$, es decir:

$$\mathbb{Z} = \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}. \quad (2)$$

En el conjunto de los enteros \mathbb{Z} están definidas dos operaciones fundamentales, a saber, la suma (+), $+: \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ y el producto (\cdot), $\cdot: \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$. Lo que exactamente se está diciendo en estas expresiones es que si a, b son dos números que pertenecen al conjunto de enteros: $a, b \in \mathbb{Z}$, entonces $a + b$ y $a \cdot b$ están en \mathbb{Z} . Dicho sea de paso, el *cero* (0) y el *uno* (1) son los elementos *neutros* para la *suma* y *producto* respectivamente, (esto es, $a + 0 = 0 + a = a$ y $a \cdot 1 = 1 \cdot a = a$ para todo $a \in \mathbb{Z}$). Con esto último y otras propiedades, no enunciadas, se dice que el conjunto \mathbb{Z} constituye un anillo conmutativo.

B. Divisibilidad

Un entero a divide un entero b , y se escribe $a|b$ con $b \neq 0$, si existe un entero c , tal que $b = a \cdot c$ en caso contrario, se dice que $a \nmid b$, (a no divide al entero b). La divisibilidad se escribe como:

$$a|b \Rightarrow b = a \cdot c. \quad (3)$$

Propiedades

1. $a|b$ entonces $a|b \cdot c$, para todo $c \in \mathbb{Z}$.
2. Si $a|b$ y $b|c$ entonces $a|c$.
3. Si $a|b$ y $a|c$ entonces $a|(bx + cy)$ para enteros x e y .
4. Si $a|b$ y $b|a$ entonces $a = \pm b$.
5. Si $a|b$, $a > 0$ y $b > 0$, entonces $a \leq b$.

Entre otras. Si el entero a es divisor de b y c , entonces $a|b$ y $a|c$. Cualquier entero tiene divisores si ocurre que $b \neq 0$ y $c \neq 0$.

Si por lo menos uno de b y c no es cero, el mayor entre sus divisores comunes se llama *máximo común divisor* (mcd) de b, c , y se denota por (b, c) .

Sea g el mcd de los números b y c :

$$g = (b, c). \quad (4)$$

Así, existen x_0 y y_0 enteros tales que:

$$g = bx_0 + cy_0. \quad (5)$$

Propiedades del mcd de (a, b) .

1. $(ma, mb) = m(a, b)$ con $m \in \mathbb{Z}$
2. Si $d|a$ y $d|b$ y $d > 0$ entonces $\left(\frac{a}{d}, \frac{b}{d}\right) = \frac{1}{d}(a, b)$.
3. Si $(a, b) = g$ entonces $\left(\frac{a}{g}, \frac{b}{g}\right) = 1$
4. Si $(a, b) = 1$ se dice que a y b son primos relativos.

II. LOS NÚMEROS PRIMOS

Se dice que un entero $p > 1$, es un número primo, o simplemente que p es primo, en caso de que no exista divisor d de p que satisfaga $1 < d < p$. Si un entero $a > 1$ no es primo, entonces se dice que es *compuesto*. Vale mencionar dos números enteros son *primos entre sí*, o *primos relativos*, en caso de no tener otro divisor común que 1 y -1 .

Un resultado fundamental dice: todo entero n mayor a 1 : ($n > 1$), puede expresarse como un producto de primos, es decir.

$$n = p_1^{a_1} \cdot p_2^{a_2} \cdot \dots \cdot p_r^{a_r}. \quad (6)$$

Donde p_1, p_2, \dots, p_r son primos y $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r$, son enteros positivos.

Ejemplos:

Determinar, y expresar los números dados como producto de primos:

- i) $2013 = 3 \cdot 671 = 3 \cdot 11 \cdot 61$, observe que 3, 11 y 61 son los factores primos de 2013, y se puede escribir:

$$2013 = (3) \cdot (11) \cdot (61)$$

- ii) $72 = 2 \cdot 36 = 2 \cdot 2 \cdot 18 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 9 = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 2^3 \cdot 3^2$ y se escribe:

$$72 = 2^3 \cdot 3^2$$

III. CRITERIOS DE DIVISIBILIDAD.

— Divisibilidad por 2

Un número es divisible por 2 si el dígito de las unidades de su numeral es par (0, 2, 4, 6, 8), o es un número par.

— Divisibilidad por 3

Un número es divisible por 3 si la suma de los dígitos de su numeral es divisible por 3.

— Divisibilidad por 5

Un número es divisible entre 5 si el último dígito de su numeral es 0 o 5.

Es interesante tener presente otros criterios de divisibilidad, por ejemplo, divisibilidad por 7, 11, 13, etc.

La experiencia cotidiana indica que pocas veces se practica la aritmética tratando de descomponer un entero como producto de primos, más aún cuando ese entero es del orden de centenas de millar o más. Por ejemplo; el número 62743, no es divisible por 11, y ello significa únicamente que: *no divisible por 11*.

Será interesante averiguar si este número es primo o compuesto: no es divisible por 2, 3, 5, 7, 11; se debe seguir el camino de ensayo error, ahora con el primo 13, $62743/13$ no es entero; $62743/17$ tampoco es entero. Y así sucesivamente hasta llegar por ejemplo al número 251, pero resulta que $62743/251$ no es entero, luego se podría concluir que 62743 es primo. ¿Cuál será el siguiente primo, posterior a 62743?

Como ejemplo de la descomposición de un número en factores primos. Consideré el siguiente: **6306300**, y tómese la siguiente convención de números primos:

$$a = 2, b = 3, c = 5, d = 7,$$

$$e = 11, f = 13, g = 17.$$

Determinando los factores primos:

$$\begin{aligned} 6306300 &= 2 \cdot 3153150 = 2 \cdot 2 \cdot 1576575 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 525525 = \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 175175 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 35035 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7007 = \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 1001 = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 91 = \\ &= 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 7 \end{aligned}$$

Con los *factores primos* obtenidos, queda establecido que el número **6306300** se puede expresar como:

$$6306300 = 2^2 \cdot 3^2 \cdot 5^2 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13.$$

Y de acuerdo con la convención anterior, queda finalmente como:

$$6306300 = a^2 \cdot b^2 \cdot c^2 \cdot d^2 \cdot e \cdot f. \quad (7)$$

5

¿Se podría imaginar el significado de la “frase” $a^2b^2c^2d^2ef$? Y de las posibles combinaciones de estas letras. Así, **jugando con leyes de los exponentes**, por ejemplo, se podría escribir **abcdeabcdf** (o muchas otras) sabiendo que *se ha escondido* la cantidad 6306300.

Lo anterior podría considerarse una forma de ocultar información. A manera de ejercicio se propone una nueva convención, por ejemplo, $z = 0, y = 1, x = 2, \dots$, etc. ¿Cómo se expresaría el número analizado?

En realidad, es poco común el uso y manejo de los números primos, por ello se pueden emplear para ocultar información, usando combinaciones o bien alguna disposición que complique su lectura, esto permitirá decir: *algo oculto subyace* y no será fácil deducir su significado. Se sugiere para aquellos cuya labor es enviar o proteger información contar con una tabla, no pequeña, de números primos para posibles aplicaciones.

IV. ECUACIONES DIOFANTINAS

Una ecuación diofantina es una ecuación lineal con coeficientes enteros, que exige solución entera. Sean $a, b, c \in \mathbb{Z}$. La ecuación lineal $ax + by = c$ tiene solución entera, si y sólo si, el $\text{de } (a, b) | c$.

Solución Particular

Sean a, b, c tres números enteros y supóngase que los enteros, x_0 e y_0 son solución de la ecuación $ax + by = c$, es decir, $ax_0 + by_0 = c$. Entonces,

$$\begin{aligned} d = \text{mcd}(a, b) &\Rightarrow d|a \text{ y } d|b \Rightarrow \\ d|ax_0 + by_0 &\Rightarrow d|c. \end{aligned} \quad (8)$$

Recíprocamente, suponga $d = \text{mcd}(a, b)$ es divisor de c , entonces,

$$\text{mcd}(a, b) \Rightarrow \text{mcd}\left(\frac{a}{d}, \frac{b}{d}\right) = 1. \quad (9)$$

Por propiedades de divisibilidad,

$$\exists p, q \in \mathbb{Z}: \frac{a}{d}p + \frac{b}{d}q = 1,$$

multiplicando por el entero c

$$\Rightarrow a \frac{cp}{d} + b \frac{cq}{d} = c,$$

siendo c/d entero puesto que, por hipótesis, d es divisor de c . Basta tomar

$$x_0 = \frac{cp}{d} \text{ e } y_0 = \frac{cq}{d}, \quad (10)$$

y se tendrá que

$$ax_0 + by_0 = c, \quad (11)$$

es decir, los enteros x_0 e y_0 son solución de la ecuación y se conoce como *solución particular del sistema*. Debe observarse que este caso asegura la existencia de solución para una ecuación de este tipo y un método de cálculo.

Ejemplo:

∞ Encontrar una solución para la ecuación diofantina:

$$525x + 100y = 50. \quad (12)$$

Solución:

En principio se debe confirmar la existencia de una solución entera para la ecuación. Luego, se requiere calcular el *mcd* de **525** y **100**, mediante la descomposición en *factores primos* de estos números:

$$525 = 3 \cdot 175 = 3 \cdot 5 \cdot 35 = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 7.$$

Análogamente

$$100 = 2 \cdot 50 = 2 \cdot 2 \cdot 25 = 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5,$$

es decir,

$$\text{mcd}(525, 100) = 25. \quad (13)$$

Ahora como **25 divide a 50** (y a 100), se asegura la existencia de soluciones enteras para la ecuación.

A. Cálculo de la solución para la ecuación.

Siguiendo el método se buscan los *coeficientes de la combinación lineal* del *máximo común divisor* de 525 y 100. Este procedimiento es equivalente al *Algoritmo de Euclides*. Si a y b son números enteros, con $b > 0$, entonces existen dos enteros, q y r , únicos, tales que $a = bq + r$, con $0 < r \leq b$. a los números a, b, q , y r , se les llama, respectivamente, *dividendo*, *divisor*, *cociente* y *residuo*.

Una solución puede ser la combinación lineal:

$$25 = 525 \cdot 1 + 100 \cdot (-5),$$

con los valores propuestos, los coeficientes $p = 1$ y $q = -5$, y una solución para la ecuación se obtiene usando:

$$x_0 = \frac{cp}{d} \text{ e } y_0 = \frac{cq}{d}. \quad (14)$$

Donde c es el termino independiente de la ecuación y, d , el *máximo común divisor* de los coeficientes de x e y . En consecuencia,

$$x_0 = \frac{50 \cdot 1}{25} = 2,$$

$$y_0 = \frac{50 \cdot (-5)}{25} = -10.$$

Solución general

Sean a, b, c enteros no nulos, tales que el máximo común divisor de a, b divide a c . Entonces la solución general de la ecuación $ax + by = c$ es:

$$\begin{aligned}x &= x_0 + k \cdot \frac{b}{d}, \\y &= y_0 + k \cdot \frac{a}{d}.\end{aligned}\tag{15}$$

Donde x_0 e y_0 es una solución particular de la misma y k es cualquier entero.

En efecto, sea d el máximo común divisor de a y b . Por hipótesis d divide a c luego, existe una solución particular $x = x_0$ e $y = y_0$ para el sistema. Entonces,

$$ax_0 + by_0 = c,\tag{16}$$

dividiendo por $d = (a, b)$, se tiene

$$\frac{a}{d}x_0 + \frac{b}{d}y_0 = \frac{c}{d}.\tag{17}$$

Siendo $\frac{c}{d}$ entero y $\frac{a}{d}, \frac{b}{d}$ números enteros *primos entre sí*, luego el máximo común divisor de ambos es 1 , y como 1 divide a $\frac{c}{d}$, se asegura la existencia de una solución particular x_1, y_1 para esta ecuación. Esto es,

$$\frac{a}{d}x_1 + \frac{b}{d}y_1 = \frac{c}{d}.\tag{18}$$

Igualando las ecuaciones anteriores

$$\begin{aligned}\frac{a}{d}x_1 + \frac{b}{d}y_1 &= \frac{a}{d}x_0 + \frac{b}{d}y_0 \Rightarrow \frac{a}{d}(x_1 - x_0) + \frac{b}{d}(y_1 - y_0) = 0 \\&\Rightarrow \frac{a}{d}(x_1 - x_0) = -\frac{b}{d}(y_1 - y_0),\end{aligned}$$

se ve que $\frac{b}{d}$ divide a

$$\Leftrightarrow \frac{b}{d} \mid \frac{a}{d}(x_1 - x_0),$$

y al ser $\frac{b}{d}$ primo con $\frac{a}{d}$, dividirá a $x_1 - x_0$, luego

$$\frac{b}{d} \mid x_1 - x_0 \Leftrightarrow \exists k \in \mathbb{Z} : x_1 - x_0 = k \cdot \frac{b}{d} \Rightarrow x_1 = x_0 + k \cdot \frac{b}{d},$$

sustituyendo el valor de $x_1 - x_0$ en $\frac{a}{d}(x_1 - x_0) + \frac{b}{d}(y_1 - y_0) = 0$ y resulta

$$\frac{a}{d} \cdot \left(k \cdot \frac{b}{d}\right) + \frac{b}{d}(y_1 - y_0) = 0 \Rightarrow \frac{a}{d} \cdot k + y_1 - y_0 = 0 \Rightarrow y_1 = y_0 - k \cdot \frac{a}{d},$$

se ve finalmente que, x_1 e y_1 es solución de la ecuación $ax + by = c$.

En efecto,

$$ax_0 + by_0 = a\left(x_0 + k \cdot \frac{b}{d}\right) + b\left(y_0 + k \cdot \frac{a}{d}\right)$$

$$\begin{aligned}
 &= ax_0 + a \cdot k \cdot \frac{b}{d} + by_0 - b \cdot k \cdot \frac{a}{d} \\
 &= ax_0 + by_0 = c,
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

luego

$$x = x_0 + k \cdot \frac{b}{d}; \quad y = y_0 - k \cdot \frac{a}{d}, \tag{20}$$

∞

es solución de la ecuación $ax + by = c$ cualquiera que sea $k \in \mathbb{Z}$, se le denomina solución general de dicha ecuación.

*Nota. En el ejemplo anterior, se llegó a:

$$x_0 = 2 \text{ e } y_0 = -10,$$

era una solución particular para la ecuación:

$$525x + 100y = 50.$$

Luego, una solución general de la misma será:

$$\begin{aligned}
 x &= 2 + k \cdot \frac{100}{25} = 2 + 4k \\
 y &= -10 - k \cdot \frac{525}{25} = -10 - 21k
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Siendo k cualquier número entero.

V. CONGRUENCIAS LINEALES

Dentro de los conceptos fundamentales de la teoría de los números se tiene la *divisibilidad*, una aplicación son las **congruencias**. Se puede decir que una *congruencia* es una afirmación sobre la divisibilidad, además de ser una *relación de equivalencia*, lo que permite agrupar a los enteros en familias disjuntas de tal manera que dos números son congruentes **módulo m** , si y solo si *pertenecen a la misma*. Estas familias se conocen con el nombre de **Clases Residuales módulo m** , y se designa por \mathbb{Z}_m al conjunto que se forma por ellas. Las *congruencias* tienen propiedades en común con la igualdad y se siguen de acuerdo con:

Teorema. Supóngase que a, b, c, d, x, y y $m > 0$ son enteros. Se dice que a y b son congruentes **módulo m** , si m divide a $a - b$: $m | a - b$, y se escribe:

$$a \equiv b \pmod{m} \tag{22}$$

B. Propiedades

1. $a \equiv b \pmod{m}$, $b \equiv c \pmod{m}$ y $a - b \equiv 0 \pmod{m}$ son proposiciones equivalentes,
2. $a \equiv b \pmod{m}$ y $b \equiv c \pmod{m}$, entonces $a \equiv c \pmod{m}$,
3. $a \equiv b \pmod{m}$ y $c \equiv d \pmod{m}$, entonces $ax + cy \equiv (bx + dy) \pmod{m}$,
4. $a \equiv b \pmod{m}$ y $c \equiv d \pmod{m}$, entonces $ac \equiv bd \pmod{m}$,
5. $a \equiv b \pmod{m}$ y $d | m$, entonces $a \equiv b \pmod{d}$.
6. Y otras, ...

VI. ECUACIÓN LINEAL EN CONGRUENCIAS.

Ahora una expresión del tipo:

$$ax \equiv b \pmod{m}. \quad (23)$$

Se dice que es una ecuación lineal en congruencias. Aquí x es una incógnita con valores en \mathbb{Z} .

Considere la ecuación

$$2x \equiv 1 \pmod{5}, \quad (24)$$

o

como $5|(2x - 1)$ entonces existe un entero k tal que

$$2x = 5k + 1, \text{ y } x = \frac{5k+1}{2},$$

así, las soluciones son de este tipo.

Nota: al realizar la división se llega a:

$$x = 2k + \frac{k+1}{2},$$

tiene solución para valores de k impares.

Sea la ecuación:

$$2x \equiv 1 \pmod{4}, \quad (25)$$

entonces $2x = 1 + 4k$, con k entero, se ve que no hay solución, pues $1 + 4k$ es impar.

Luego la ecuación lineal en congruencias $ax \equiv b \pmod{m}$ tiene soluciones cuando y sólo cuando el mcd de a y m es divisible por b : $(a, m)|b$.

Si este es el caso, sea $d = (a, m)$, se tienen hasta d soluciones congruentes $((\pmod{m})$ y todas congruentes $(\pmod{\frac{m}{d}})$.

En efecto, si $ax \equiv b \pmod{m}$ tiene por solución c , entonces $ac \equiv b \pmod{m}$, por lo que $ac - b = mk$, luego $b = -mk + ac$, se observa que $d|b$, puesto que $d = ac + mk$ es una combinación lineal de a y m .

Inversamente, si $d|b$, entonces, $b = dk$ para alguna k , ahora por definición:

$$d = ac + mt, \Rightarrow dk = ack + mtk, \Rightarrow a(kc) = b \pmod{m}.$$

Si $d|b$, se tiene que $ac = b + mx$, dividiendo por d

$$\left(\frac{a}{d}\right)c = \frac{b}{d} + \left(\frac{m}{d}\right)x, \Rightarrow \left(\frac{a}{d}\right)c \equiv \frac{b}{d} \pmod{\frac{m}{d}}$$

Luego $\left(\frac{a}{d}, \frac{m}{d}\right) = 1$, y c existe. Así, cualquier solución de la congruencia $ax \equiv b \pmod{m}$ es una solución de la congruencia:

$$\left(\frac{a}{d}\right) \equiv \left(\frac{b}{d}\right) \pmod{\frac{m}{d}}, \quad (26)$$

Se puede verificar que las soluciones de $ax \equiv b \pmod{m}$ son del tipo $c + \frac{km}{d}, k \leq d-1$.

Ejemplos

:

1. Considere la ecuación $5x \equiv 7 \pmod{15}$

$d = (5, 15) = 5$, $5 \nmid 7$, luego no hay soluciones enteras a la congruencia.

2. Considere la ecuación $5x \equiv 10 \pmod{20}$

$d = (5, 20) = 5$ y como $5 \mid 10$, luego hay soluciones (*mód 20*).

Obsérvese que al dividir por 5, se tiene que:

$$5x \equiv 10 \pmod{20} \Rightarrow x \equiv 2 \pmod{4}, \quad (27)$$

de la última, las soluciones son de tipo $4k + 2$ con $0 \leq k \leq 4$, Es decir, **2, 6, 10, 14, 18**.

3. Considere la ecuación

$$6x \equiv 5 \pmod{17}, \quad (28)$$

$d = (6, 17) = 1$ y como $1 \mid 5$, hay soluciones enteras.

Dado que $17 \mid (6x - 5) \Rightarrow 6x = 5 + 17k \Rightarrow x = \frac{17k+5}{6}$, realizando la división se tiene que:

$$x = 2k + \frac{5k+5}{6} = 2k + \frac{5(k+1)}{6}.$$

Nuevamente x es entera si $\frac{5(k+1)}{6}$ es entera. Por ejemplo, si $k = 1$, se tiene:

$$x = 2(1) + \frac{5(1+1)}{6} = \frac{22}{6},$$

que no es un valor entero.

Ahora sea $k = 5$

$$x = 2(5) + \frac{5(5+1)}{6} = 15 \Rightarrow 6(15) \equiv 5 \pmod{17}.$$

Verificando

$$17 \mid 90 - 5 \Rightarrow 17 \mid 85 \Rightarrow 85 = 17(5) = 85.$$

VII. APLICACIONES

En la teoría *elemental* de números, se estudian los números enteros sin emplear técnicas procedentes de otros campos de las matemáticas. Pertenecen a esta teoría *la divisibilidad, el algoritmo de Euclides, la factorización de los enteros como producto de números primos, la búsqueda de los números perfectos, las congruencias, las ecuaciones Diofantinas*, etc.

11

Dentro de múltiples y variadas aplicaciones está el desarrollo de técnicas para ocultar información que requiere ser confidencial y poco factible de ser sustraída. Se debe de buscar algún método poco o difícil de vulnerar que impida el *robo* de información, confiable y difícil de violar candados que se impongan.

Se debe *ocultar* el contenido de la información de manera que haga falta una interacción concreta para poder entender ese contenido. Un método para realizar esta acción es la **encriptación**, es decir, ocultar la información haciendo la conversión del *lenguaje natural* en un texto *codificado o cifrado* que lo haga ilegible e ininteligible.

Dada la complejidad de la teoría de números en cuanto a sus propiedades y puesto que la inmensa mayoría son poco usuales, estos métodos se pueden emplear para obtener procedimientos y encriptar información. Así, si se considera que una población como el universo de estudio, la teoría de números reduce notablemente el tamaño de la misma, y las técnicas más avanzadas la minimizan siendo esto un ingrediente esencial como técnica de seguridad.

Considere una **ecuación diofantina**, cuya solución permitirá encriptar un mensaje y al mismo tiempo elaborar la *llave* para conocer el contenido.

1. Sea la ecuación:

$$123x + 57y = 53. \quad (29)$$

En principio se debe encontrar el *máximo común divisor* de 123 y 57 (123,57). Para ello se descompone cada uno de estos números en sus factores primos:

$$123 = 3 \cdot 41 \text{ y } 57 = 3 \cdot 19 \therefore (123, 57) = 3.$$

Como $3|57$, la ecuación *tiene soluciones en números enteros*, así la ecuación planteada es *diofantina*.

Si la ecuación original se divide entre 3:

$$41x + 19y = 177, \quad (30)$$

despejando y ,

$$y = \frac{177 - 41x}{19} = 9 - 2x + \frac{6 - 3x}{19},$$

y es entera si y sólo si $\frac{6-3x}{19}$ lo es. Sea $r_1 = \frac{6-3x}{19}$, y supóngase que $r_1 \in \mathbb{Z}$. Despejando a x de esta última ecuación

$$r_1 \cdot 19 = 6 - 3x \Rightarrow x = \frac{6 - 19r_1}{3} = 2 - 6r_1 - \frac{r_1}{3}.$$

Luego, $x \in \mathbb{Z}$, si $\frac{r_1}{3}$ también lo es asignando valores a r_1 que sean múltiplos de 3, se tiene:

$$\text{Si } r_1 = 3, \text{ se tiene que } x = \frac{6-57}{3} = -17; y = 9 - 2(17) + \frac{6-3(-17)}{19} = 46$$

Realizando el mismo proceso para los múltiplos siguientes:

$$\text{Si } r_1 = 6; x = \frac{6-114}{3} - 36; y = 87,$$

$$\text{Si } r_1 = 9; x = \frac{6-171}{3} - 55; y = 128,$$

$$\text{Si } r_1 = 12; x = \frac{6-228}{3} - 74; y = 169.$$

Considérese las parejas de valores de x e y

$$-17, 46; -36, 87; -55, 128; -74, 169$$

Una técnica sencilla para encriptar es usar la asignación de números a letras de una palabra de extensión grande, por ejemplo, **MURCIELAGO**. Como puede observarse son diez (10) letras distintas.

Se puede convenir la siguiente asignación:

$$0 \rightarrow M, 1 \rightarrow U, 2 \rightarrow R, 3 \rightarrow C, 4 \rightarrow I, 5 \rightarrow E, 6 \rightarrow L, 7 \rightarrow A, 8 \rightarrow G, 9 \rightarrow O$$

La ecuación diofantina usada es

$$123x + 57y = 53, \quad (31)$$

y puede escribirse con el encriptamiento:

$$URGx + EGy = ECU \quad (32)$$

La clave para descryptar es:

$$-UA, IL; -CL, GA; -EE, URG; -AI, UAO.$$

Obsérvese la asignación, de números a letras dada. Claramente un lenguaje poco convencional, y requiere del conocimiento en la solución de ecuaciones diofantinas.

Ahora considérese el caso de una congruencia (*mód* m) para el mismo cometido, *encriptar información*. Sea la ecuación lineal en congruencias.

$$15x \equiv 25 \pmod{35} \quad (33)$$

Entonces el $(15, 35) = 5$ y $5|25$ se tienen $\left(\frac{25}{5}\right) = 5$ soluciones congruentes (*mód* 35).

Dividiendo por 5 la congruencia, se tiene $3x \equiv 5 \pmod{7}$, luego $3x = 5 + 7k$

$$x = \left(\frac{5+7k}{3}\right) = 1 + 2k + \left(\frac{2+k}{3}\right),$$

x es entera si, $\left(\frac{2+k}{3}\right)$ lo es.

Entonces:

Sea $k_1 = \left(\frac{2+k}{3}\right)$

1. Si $k = 1 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+1}{3}\right) = 1$ por lo que si $k = 1$, $k_1 = 1$ y el valor de $x = 4$,
2. Si $k = 2 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+2}{3}\right) = \frac{4}{3} \notin \mathbb{Z}$ no es solución de la congruencia,
3. Si $k = 3 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+3}{3}\right) = \frac{5}{3} \notin \mathbb{Z}$ no es solución de la congruencia,
4. Si $k = 4 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+4}{3}\right) = 2 \in \mathbb{Z}$ por lo que si $k = 4$, $k_1 = 2$ y el valor de $x = 11$,
5. Si $k = 5 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+5}{3}\right) = \frac{7}{3} \notin \mathbb{Z}$ no es solución de la congruencia,
6. Si $k = 6 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+6}{3}\right) = \frac{8}{3} \notin \mathbb{Z}$ no es solución de la congruencia,
7. Si $k = 7 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+7}{3}\right) = 3 \in \mathbb{Z}$ por lo que si $k = 7$, $k_1 = 3$ y el valor de $x = 18$,
8. Si $k = 10 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+10}{3}\right) = 4 \in \mathbb{Z}$ por lo que si $k = 10$, $k_1 = 4$ y el valor de $x = 25$,
9. Si $k = 13 \Rightarrow k_1 = \left(\frac{2+13}{3}\right) = 5 \in \mathbb{Z}$ por lo que si $k = 13$, $k_1 = 5$ y el valor de $x = 32$.

Se realizaron operaciones a fin de calcular valores de las constantes y con ellos determinar valores de la incógnita. *Hubo saltos*, y fueron para verificar que algunos valores no son enteros.

Los resultados obtenidos para x son **4, 11, 18, 25, 32** y se pueden verificar en la congruencia:

- i. $15(4) \equiv 25(mod\ 35) \Rightarrow 35|60 - 25 = 35 \Rightarrow 35|35 = 1$ *se verifica*,
- ii. $15(11) \equiv 25(mod\ 35) \Rightarrow 35|165 - 25 = 140 \Rightarrow 35|140 = 4$ *se verifica*,
- iii. $15(18) \equiv 25(mod\ 35) \Rightarrow 35|270 - 25 = 245 \Rightarrow 35|245 = 7$ *se verifica*,
- iv. $15(25) \equiv 25(mod\ 35) \Rightarrow 35|375 - 25 = 350 \Rightarrow 35|350 = 10$ *se verifica*,
- v. $15(32) \equiv 25(mod\ 35) \Rightarrow 35|480 - 25 = 455 \Rightarrow 35|455 = 13$ *se verifica*.

De nueva cuenta considérese que la palabra clave es **MURCIELAGO** con la asignación de números a letras establecidos. Como la ecuación en congruencias es:

$$15x \equiv 23 (mod\ 35), \quad (34)$$

se puede escribir como: (35)

$$UEx \rightarrow RE(CE),$$

así mismo, la clave para descryptar (los valores de x obtenidos), son

$$IUUGRECR \rightarrow [4\ 11\ 18\ 25\ 32]$$

Difícil de leer y más aún, con un significado ininteligible. Sin duda contiene información que no será fácil de sustraer. Se pueden emplear palabras de su invención o conocidas del lenguaje común, por ejemplo, **CENTRIFUGA**, contiene diez letras que no se repiten y se les puede dar la asignación referida.

Otro ejemplo de aplicación de ecuaciones en congruencias **módulo m** , es para establecer la relación entre meses del año, días de la semana, horas del día. Así para los meses se tendrá congruencias **módulo 12**, para los días **módulo 7** y para las horas **módulo 24**.

Algunas personas acostumbran a emplear su fecha de nacimiento, o de algún familiar, como clave de acceso a su información, el uso de congruencias la oculta dando mayor seguridad. Por ejemplo, una fórmula para determinar el día de la semana en que nació una persona es:

$$d \equiv f + \left\lfloor \frac{13m-1}{4} \right\rfloor - 2s + n + \left\lfloor \frac{s}{4} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{4} \right\rfloor \pmod{7}. \quad (36)$$

14

Dónde: f es la fecha (día del mes), m es el mes, s es el siglo, que, a su vez, es el número de siglos, y n es el año de nacimiento. Dada la complejidad del procedimiento, implica para quien pretendiera acceder a esta información, conocimientos sobre el tema, y si así fuese, demandaría saber la manera en cómo se asignaron números a días, meses y años, empresa que requiere de un gran esfuerzo mental.

Si se busca aumentar la seguridad en el manejo de información, el empleo de congruencias ayudará a este cometido. Por ejemplo, el uso de *números primos*, o empleando el *teorema chino del residuo*, o *congruencias de grado superior*, etc.

Se ha mostrado el beneficio que aporta la teoría de números, y en particular las **Ecuaciones Diofantinas y las Congruencias Módulo m** ; la complejidad alcanzada indica que es no fácil su lectura y comprensión.

VIII. CONCLUSIONES

1. Lo visto es sólo un acercamiento a la teoría de los números, se ha pretendido con algunos ejemplos, convencer de los beneficios intelectuales que aporta el estudiarla.
2. La teoría de números es *parte de la estructura matemática y ayuda en la construcción lógica del pensamiento*, pues permite discernir problemas complejos y su solución.
3. La teoría de los números como rama de la matemática, aunque teórica y árida, revela posibles aplicaciones en diferentes áreas de la técnica.
4. El mundo que nos rodea es aritmética, geometría y en particular teoría de los números, a lo largo del tiempo se han puesto de manifiesto su importancia en el desarrollo de otros conocimientos, por ello es importante en el ámbito profesional que se posean este tipo de conocimientos.

REFERENCIAS

- [1] C. Niven, H. Zuckerman, *Introducción a la Teoría de los Números*, 2ª ed., México: Limusa, 1976.
- [2] Y. Vinogradov, *Fundamentos de la Teoría de los Números*, URSS: MIR, 1977.
- [3] J. Gómez, *Matemáticos, Espías y Piratas Informáticos, Codificación y Criptográficas*, México: RBA, 2010.
- [4] L. Cárdenas, et al., *Álgebra Superior*, 2ª ed., México: Trillas, 1990.