

ISSN 2594-2921

Científica

Científica: Journal of Electromechanical Engineering | vol. 29, no. 1 | January-June 2025 | Instituto Politécnico Nacional | <https://cientifica.site/>



Volumen 29 Issue 1, January-June 2025

Implementation of an Automated Solanum Tuberosum Grading System using Image Processing

Implementación de un sistema automatizado de clasificación de Solanum Tuberosum mediante procesamiento de imágenes

Armando Josué **Piña Díaz**, Mauricio Aarón **Pérez Romero**, Iván Lenín **Cruz Jaramillo**.

PDF
Científica

Marco normativo en maniobras de libranza en la zona de operación de transmisión Puebla-Tlaxcala de la Comisión Federal de Electricidad

Regulatory Framework for Switch Off Maneuvers in the Puebla-Tlaxcala Transmission Operation Zone of the Federal Electricity Commission

José Luis **Mar Villegas**, Juan Carlos **Escamilla Sánchez**.

[Dissemination]

PDF
Científica

Desarrollo de un sistema de traducción de textos impresos al braille mediante la metodología de diseño mecatrónico

Development of a Printed Text to Braille Translation System using the Mechatronic Design Methodology

Umanel **Hernandez Gonzalez**, Flabio **Mirelez Delgado**, José **Díaz Pérez**,
Jesús **Letchipia Padilla**, Roberto **Cruz Leija**.

PDF
Científica

La regresión logística como clasificador en el diagnóstico de fallas eléctricas en un generador síncrono de imanes permanentes

Logistic regression as a classifier in the diagnostic of electrical failures in a permanent magnet synchronous generator

José Antonio **Álvarez Salas**, Ricardo **Álvarez Salas**, Francisco Javier **Villalobos Piña**, Mario Arturo **González García**, Amparo **Rodríguez Cobos**, J. Rafael **Molina Contreras**.

PDF
Científica

Cálculo de la impedancia de transformadores utilizando el Método de Elemento Finito

Transformer Impedance Calculation Using the Finite Element Method

Angel R. **Hernández Santiago**, Rodrigo **Ocón Valdez**, Mariana **Vasquez Cañas**, Leonardo A. **Rico García**, Fermín P. **Espino Cortés**.

PDF
Científica

Aplicación de un algoritmo evolutivo en el estudio del contenido de actínidos menores en celdas de combustible de un reactor de agua en ebullición

An application of an evolutionary algorithm in the study of a boiling water reactor fuel lattices with minor actinides

José Luis **Montes Tadeo**, Eduardo **Martínez Caballero**, José Ramón **Ramírez Sánchez**.

PDF
Científica

Diseño, simulación y construcción de una mesa de pruebas para medición de temperaturas en barras metálicas

Design, Simulation and Construction of a Test Table
for Temperature Measurement in Metal Bars

Liliana **Gutiérrez Lonche**, Iván **González Uribe**, Madian Jabnel **Hernández Sánchez**,
Danya Analí **Álvarez Suárez**, Miguel Ángel **Valencia Saravia**.



Aprendizaje en modelos lineales multi-respuesta en altas dimensiones con búsqueda cuántica no oracular (cuando el rango de la matriz de coeficientes es conocido)

Learning in High-Dimensional Multi-response Linear Models with Quantum non-Oracular Search
(when the range of the coefficient matrix is known)

Víctor Hugo **Hernández Castillo**.

[Dissemination]



WebVR Platform for Simulation and Control of Electromechanical Systems in a Virtual Environment

Plataforma WebVR para la simulación y el control de sistemas electromecánicos
en un entorno virtual

Michel Alejandro **Cruz Martínez**, Alejandro **Rodríguez Molina**, Gerardo **Hernández Hernández**,
Mario **Aldape Pérez**, Miguel Gabriel **Villarreal Cervantes**, Allan Balam **Rueda Gutiérrez**.



Preparation pressure effects on proposed thermoluminescent gamma radiation detectors fabricated from single wall carbon nanotubes (SWCNT)

Análisis de los efectos de la presión de fabricación de pastillas de nanotubos de carbono de pared simple como posible detector termoluminiscente de radiación gamma

Alejandro **Ortiz Morales**, Jaime **Ortiz López**, Benjamín **Leal Acevedo**, Ramón **Gómez Aguilar**.



CIENTIFICA, year 29, issue 1 January-June 2025. Biannual Journal online published (under a continuous publication model) 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. Cover-Photo Tembela Bohle: <https://www.pexels.com/es-es/foto/camara-negra-en-fotografia-en-escala-de-grises-2050720/>. 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.

Implementation of an Automated *Solanum Tuberosum* Grading System using Image Processing

Implementación de un sistema automatizado de clasificación de *Solanum Tuberosum* mediante procesamiento de imágenes

Armando Josué Piña Díaz¹, Mauricio Aarón Pérez Romero², Iván Lenín Cruz Jaramillo³

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Ciudad de México, MÉXICO

¹ORCID: 0000-0002-2723-6369 | apinad@ipn.mx

²ORCID: 0009-0005-5639-770X | maperezro@ipn.mx

Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco, Estado de México, MÉXICO

³ORCID: 0000-0002-7832-1686 | breaking_182@hotmail.com

Recibido 07/10/2024, aceptado 20/12/2024.

Abstract

Automated vision systems are used as an effective solution to improve accuracy in objects inspection. However, the transition from manual sorting methods to automated systems has been slow due to factors such as the size and shape of the objects to be inspected. In the food industry, tubers represent a challenge for vision systems due to their high dimensional and morphological variability.

This paper presents the design and implementation of an automated system for sorting *Solanum tuberosum* (potato) based on machine vision and image processing technologies. The system employs a low-cost camera together with an algorithm developed in LabVIEW™, which allows determining the size of tubers in a production line. Sorting is carried out by means of a servo-driven sorting mechanism, achieving greater accuracy and efficiency compared to traditional manual methods.

A controlled lighting system was implemented to optimize the quality of the captured images, which allowed for a significant reduction in sorting errors. The results showed a 260% increase in production capacity and a 75% reduction in the error rate, validating the effectiveness of the proposed solution to improve both productivity and process quality in the food industry. In addition, the system offers a high level of flexibility and safety in operation.

By improving potato grading efficiency and reducing the need for manual intervention, a return on investment is anticipated, as well as a positive impact on process responsiveness, which could lead to an increase in product demand.

Index terms: Automatic classifier, image processing, machine vision, LabVIEW™, automation.

Resumen

Los sistemas de visión automatizada se emplean como una solución eficaz para mejorar la precisión en la inspección de objetos. Sin embargo, la transición de métodos manuales de clasificación a sistemas automáticos ha sido lenta debido a factores como el tamaño y la forma de los objetos a inspeccionar. En la industria alimentaria, los tubérculos representan un desafío para los sistemas de visión debido a su gran variabilidad dimensional y morfológica.

Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema automatizado para la clasificación de *Solanum tuberosum* (papa) basado en tecnologías de visión artificial y procesamiento de imágenes. El sistema emplea una cámara de bajo costo junto con un algoritmo desarrollado en LabVIEW™, que permite determinar el tamaño de los tubérculos en una línea de producción. La clasificación se lleva a cabo mediante un mecanismo separador activado por servomotores, logrando una mayor precisión y eficiencia en comparación con los métodos manuales tradicionales.

Se implementó un sistema de iluminación controlada para optimizar la calidad de las imágenes capturadas, lo que permitió reducir significativamente los errores en la clasificación. Los resultados mostraron un incremento del 260% en la capacidad de producción y una reducción del 75% en la tasa de errores, validando la efectividad de la solución propuesta para mejorar tanto la productividad como la calidad del proceso en la industria alimentaria. Además, el sistema ofrece un alto nivel de flexibilidad y seguridad en su operación.

Al mejorar la eficiencia en la clasificación de papas y reducir la necesidad de intervención manual, se anticipa una rápida recuperación de la inversión, así como un impacto positivo en la capacidad de respuesta del proceso, lo que podría llevar a un aumento en la demanda del producto.

Palabras clave: Clasificación automática, procesamiento de imágenes, visión artificial, LabVIEW™, automatización.

I. INTRODUCTION

Nowadays, vision systems represent adaptive solutions for product inspection in almost all industry sectors, from automotive to pharmaceutical [1]. Image processing systems basically consist of the automatic deduction of the structure and properties of a three-dimensional, possibly dynamic, system from one or more two-dimensional images. In this area of knowledge, concepts from color physics, optics, electronics, geometry, algorithms and computer systems are used.

Automated produce sorting using machine vision represents a promising solution to address the challenges of efficiency, accuracy, and scalability in food inspection [2]. This field integrates technologies such as digital cameras, image processing algorithms, and automated control to sort produce based on physical characteristics such as size, shape, color, and surface defects [3]. In recent years, machine vision systems have become a key tool for automating agricultural processes [4]. According to [5], these technologies have found applications in pest detection, crop classification and quality assessment, highlighting their ability to handle large volumes of data in real time. In the specific case of tubers such as potato, the high dimensional and morphological variability represents an important challenge. In [6] it was identified that, without precise illumination control and robust contour analysis techniques, systems tend to fail in uncontrolled environments.

In terms of advanced techniques, hybrid methods have gained relevance. In [7], an approach combining illumination enhancement techniques, contour-based segmentation algorithms and machine learning was proposed to classify irregularly shaped products. This approach has shown significant improvements in accuracy, although it increases system complexity and computational requirements.

An image is a two-dimensional representation of a three-dimensional world scene. The image is the result of the acquisition of a signal provided by a sensor, in this case a camera, which converts information from the electromagnetic spectrum into numerical encodings [8]. Generically, a digital image is defined as a matrix (or vector) of dimensions $n \times m$, containing a discrete value that quantifies the level of information of the corresponding element, represented with a finite number of bits [9]. Each of these discrete elements is called a pixel and generally contains the illumination level or color of a point in the scene [10].

In recent years, machine vision systems have proven to be a fundamental tool in the industrial field, particularly in the automation of inspection and sorting processes. These systems are adapted to the specific needs of each application and are used in sectors as diverse as the automotive, pharmaceutical and food industries.

Image processing systems group a set of elements such as illumination sources, scene media, filters or diffusers, and sensors [11]. Fig. 1 schematizes the basic elements of an image processing system.

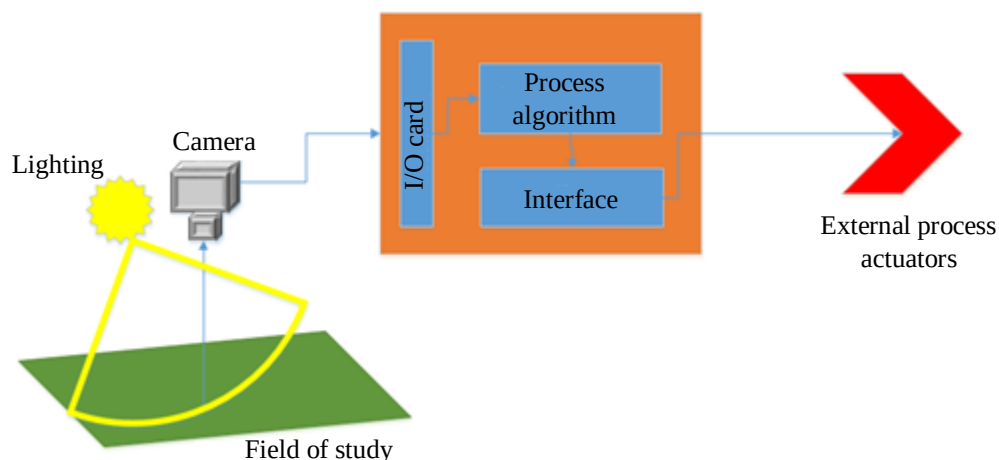


Fig. 1. Basic diagram of an image processing system.

Proper illumination is vital to obtain a correct image in which there are no saturated areas or shadows hiding information within the image. To match the vision system to the application, the following parameters need to be considered: field of view, resolution, distance between the camera and the object, and depth of field [12].

In the food industry, the grading of products such as tubers represents a challenge due to the variability in size and shape of the tubers [13]. Traditional manual inspection methods are inefficient and prone to errors, generating operator fatigue and decreasing productivity. Faced with this problem, the implementation of automated vision systems is presented as a viable solution, improving sorting accuracy and reducing the workload [14].

This paper describes the design and implementation of an automated potato grading system based on image processing, using technologies such as Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW™) and low-cost cameras. The main objective is to optimize the size separation process, ensuring accurate and efficient grading, minimizing errors and increasing productivity in the plant.

II. METHODOLOGY

The design of the automated potato sizing system was based on a detailed analysis of the current condition and improvement needs for the case study. The current sorting process is carried out manually by three workers who separate the product according to size. This process is inefficient and error prone due to fatigue and lack of visual accuracy. The need was identified to automate the inspection and separation of the product using an artificial vision system to reduce the workload and increase accuracy.

An average of 10 Tons of potatoes are evaluated weekly in an area of 32 m² defined within the building. There is a hopper with a capacity of 700 kg, which is filled with the product for distribution to a 4 m long conveyor belt, where it is inspected and classified manually. For the classification system, the potato is considered in a simplified way as an oval geometric shape. The system is based on two separation criteria, the first criterion considers a major axis with a value exceeding 7 cm. The second criterion corresponds to a major axis with a range of 0 to 7 cm. Fig. 2 shows a sample of the potatoes found in the warehouse and their dimensions. It should be noted that 7 out of 10 potatoes are large, which means that the classification is based on the fact that the majority of the product is large.

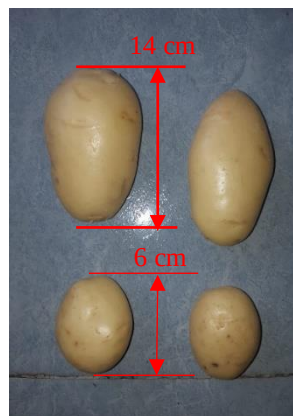


Fig. 2. Sample product and average measurements.

Given that this is a product with variable dimensions and shapes, it is not possible to determine precisely the quantity of potatoes evaluated per minute, but it is estimated that to cover the 10 tons per week, each worker sorts an average of 1 kg per minute.

A. Proposed solution

Several alternatives to automate the process were evaluated, and it was decided to implement an image processing system to analyze the size of the potatoes according to their contours. This system is complemented with a separating mechanism driven by geared motors.

The integration of the proposed prototype involves five important units: Dispensing mechanism and conveyor belt, darkroom and image acquisition and processing system, separating mechanism, control board and power stage. Fig. 3 shows the schematic of these units. For the conveyor belt drive, a Bosch geared motor was chosen, which meets the power and power supply requirements of the system. This motor can provide the necessary force to move the potatoes along the belt without compromising the efficiency of the system. A Logitech C920 HD Pro camera was used, which offers Full HD 1080p recording and is compatible with the LabVIEW™ image acquisition system. In addition, it has zoom, brightness and contrast control, as well as a high-speed USB 3.0 connection, which benefits data transmission to the computer.

LabVIEW™ was selected for this project because of its superior technical capabilities for real-time data acquisition and processing applications. It offers direct hardware integration and optimized algorithms for real-time analysis with a latency of 50 ms per image. Compared to low-cost platforms, LabVIEW™ reduces implementation time by 30% and stands out for its compatibility with industry-standard protocols such as RS232, Modbus and TCP/IP. Its graphical approach simplifies parallel tasks, such as simultaneous image processing and actuator control, ensuring stability and efficiency. Although expensive to license, its advantages justify the investment for industrial applications where speed and stability are essential.

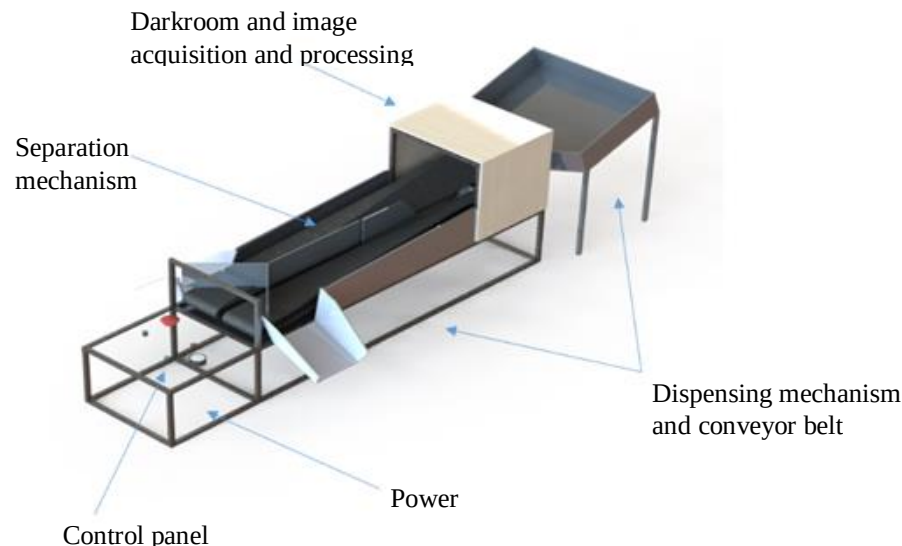


Fig. 3. Potato inspection and grading system scheme.

Inside the darkroom, the camera is placed at a height of 35 cm from the observation plane, pointing at a perpendicular angle to the plane where the product to be evaluated flows. The system has a control panel and a Human Machine Interface (HMI) that allows data processing and actuator control. The HMI includes options to adjust the size of the potatoes to be graded and to monitor the system status in real time. This solution allows rapid development of image processing applications and control of data acquisition from the camera and actuators. Proper image acquisition depends on an adequate lighting system. A 3 watt white light LED bulb was used in a structure designed to avoid shadows and improve the contrast of the potatoes on the conveyor belt. This structure ensures uniform illumination, which facilitates image processing and analysis (shown in Fig. 4).

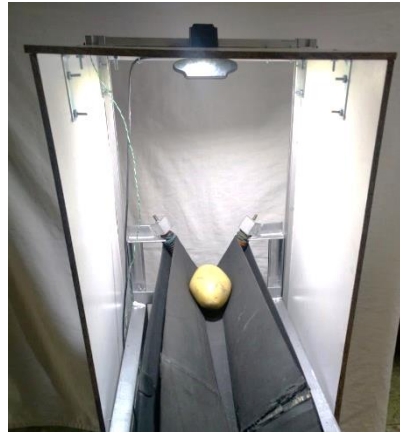


Fig. 4. Darkroom system.

The process starts when the potatoes dumped into the hopper begin to fall onto the conveyor belt by gravity. To linearize the flow of potatoes, ensuring that each potato passes individually through the visual inspection area before being sorted by the separation system, a 35° parallel belt system was designed. In the final section of the path, the parallel belts are aligned completely horizontal on the transverse axis of the structure. The total dimension of the parallel belts is 2 m up to the traction roller which is coupled to the geared motor in order to facilitate the separation of the potatoes by means of a flag type diverter. Once the product is on the belts, it enters the dark room with artificial lighting. The camera captures the information about the size of the potato by means of a continuous video, the algorithm makes a comparison of the acquired image with the desired measurements previously assigned that are stored in the interface. In this way the size of the potatoes can be inspected. Fig. 5 shows the simplified process in a flow chart of the algorithm.

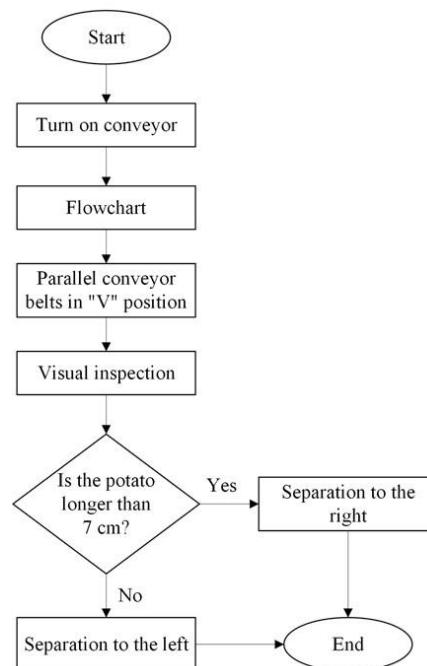


Fig. 5. Flow diagram of the potato inspection and grading process.

Image processing consists of transforming the image originally obtained into a grayscale image, as shown in Fig. 6. This is done to facilitate the color contrast between the potato and the conveyor belt. Since, the system identifies the shades of gray as analog values, on the monochromatic scale. The totally black color is assigned with a value of 0 and the white color with 255, with a spectrum of grays within it.

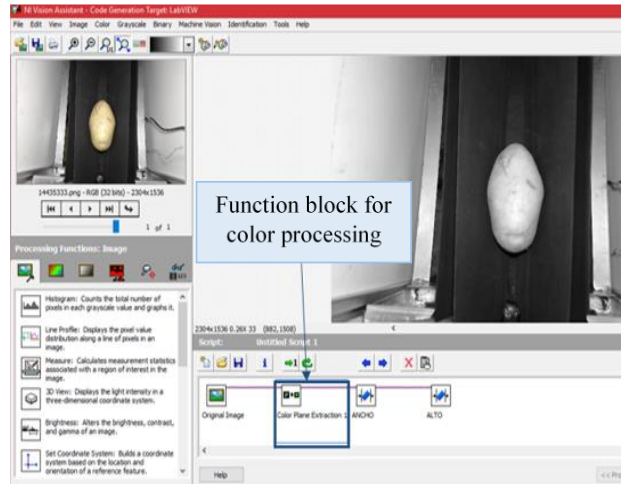


Fig. 6. Image processing with grayscale.

Once the original image has the color treatment, it goes to the next stage where the contours of the product are measured. This is done by scanning the pixels of the image, and when it detects a change in the color tone of the pixels, the system recognizes the outline of the product. Any value other than 0 is set to form the **outline** of the item under inspection. A horizontal and a vertical scan of the image is used to detect the longest size of the potato, since this is the operating condition for deciding its classification. Fig. 7 shows the detection of the width of the product.

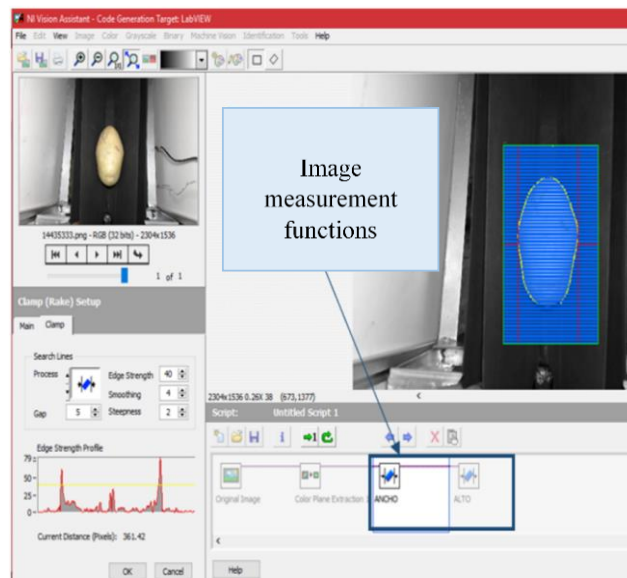


Fig. 7. Configuration of the function to measure the largest and smallest diameter of the potato.

After contour detection, logic functions are used to determine, from the measurements provided by the image processing, whether it is classified as a small or large size product.

The user interface was designed under the ISA 101 HMI standard and is the center of control, monitoring and processing of all signals and allows manipulation of system functions, such as stopping the conveyor belt, displaying the product image in real time and executing the decisions made by the classification software determined for each item under inspection. Fig. 8 shows an overview of the user interface workspace. In section 1, the image captured by the digital camera can be displayed. The indicators in section 2 show the activation status of the conveyor and dispenser. The interface has a panel for system control, for security reasons the start button was omitted so that the prototype can only be operated from the local station. It lights up in blue when a product larger than the requested size is detected and the other one lights up in violet when a smaller product is detected. Sections 3 and 4 represent the stop buttons available. The stop buttons act on the dispenser and the conveyor belt. Section 5 shows the size indicators.

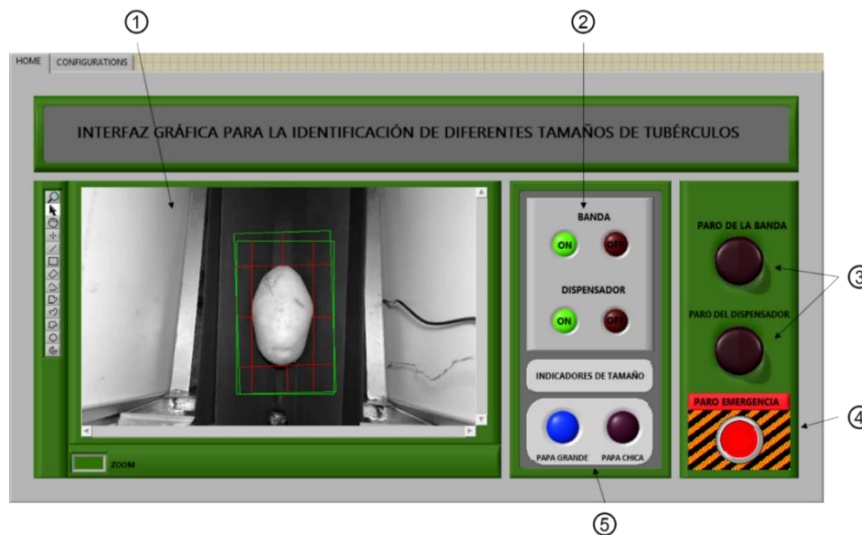


Fig. 8. HMI screen of the potato inspection and grading system.

The emergency stop button is located on the interface, when pressed, it should stop the entire system and in turn send a message with the legend “Emergency stop active”, for which, subsequently the option to reset is given, as demonstrated in Fig. 9.

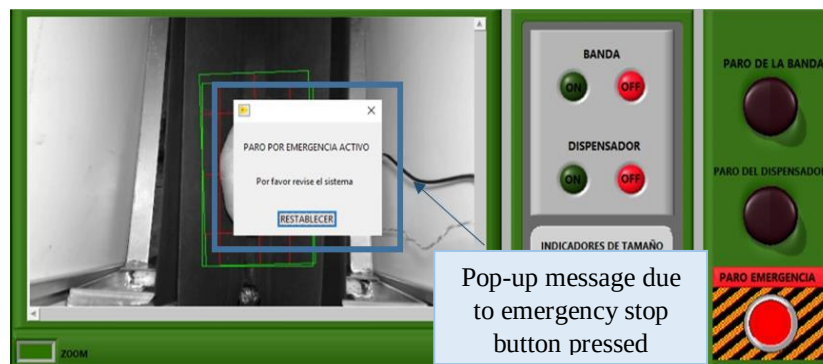


Fig. 9. HMI screen with emergency stop pop-up message.

Fig. 10 displays the operation of the product size indicators, and the classification assigned to them.

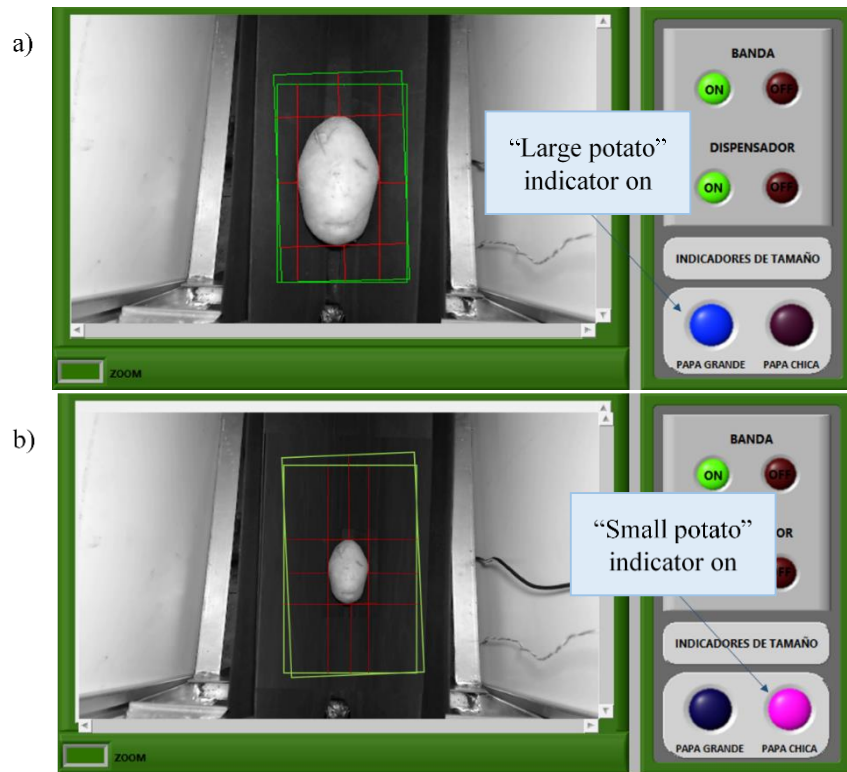


Fig. 10. a) Large potato indicator detected on the interface b) Small potato indicator detected on the interface.

In the selection tab in the size indicator menu of the HMI, the scale adjustment parameters can be configured. An image should be used as a reference and the scale should be chosen until the measurements of the object are visible in the selection box, see Fig. 11.



Fig. 11. Detection scale adjustment screen.

The scale was previously adjusted according to the height at which the camera is installed. Fig. 12 shows the operation of the separator device for product sorting by size.

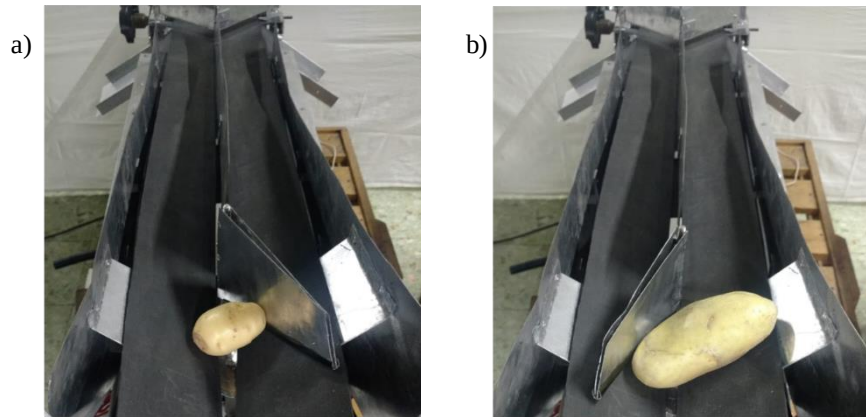


Fig. 12. a) Separation of small potato detected at interface, and b) Separation of large potato detected at the interface.

III. RESULTS

One of the main indicators of success of the system is the increase in productivity, which is quantified from the volume of potatoes processed each time. A comparison between the manual process and the automated process is presented below (see Fig. 13):

Manual process: in one hour, the three operators sort about 90 kg of potatoes. In a 16-hour working day, 1,440 kg are processed. Over 7 days, up to 10,080 kg of potatoes can be processed.

Automated process: The automated system can sort up to 240 kg of potatoes per hour. In a 16-hour workday, the system sorts 3,840 kg, which represents a significant increase. In a week (7 days), the system can process 26,880 kg, increasing production capacity by 266.66% compared to the manual process.

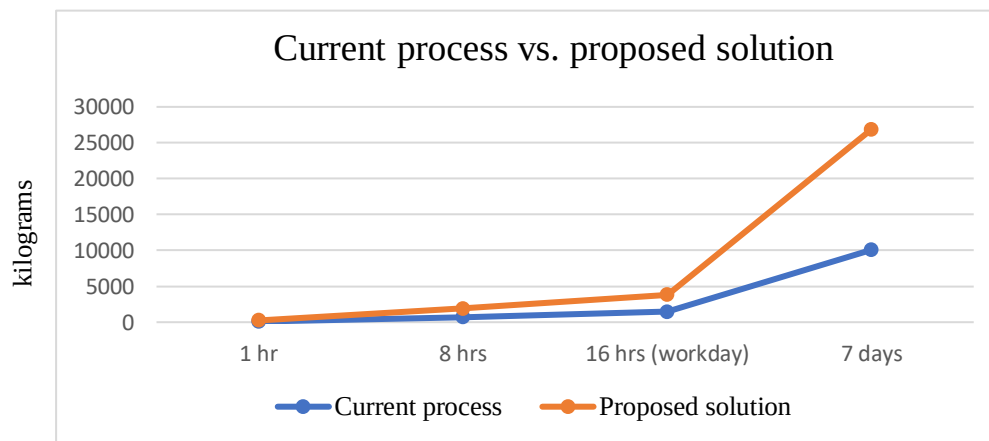


Fig. 13. Comparative plot between current process and semi-automated proposal.

This improvement not only reduces operating time, but also increases responsiveness to product demand, allowing the warehouse to process a larger volume of potatoes without increasing labor.

In the manual process, potato grading is subject to operator variability and fatigue, which generates an average error rate of 2.02% in size separation. This error is related to factors such as lack of visual accuracy, fatigue and subjectivity in sorting. With the automated system, the results were significantly better. The error rate of the automated system is only 0.44%, which implies a reduction of more than 75% in sorting errors. This accuracy is due to the use of an image processing algorithm that measures potato diameter with high consistency, eliminating the variability associated with the human factor.

The system allows the speed of the dispenser and conveyor belt to be controlled by the HMI, as illustrated in Fig 14. This adjustment ensures that the flow of potatoes is adequate and avoids pile up that could affect grading. It is recommended to operate the system at 80% of the gearmotor rated speed to optimize inspection time without compromising accuracy. This provides flexibility to adapt the system to different operating conditions.

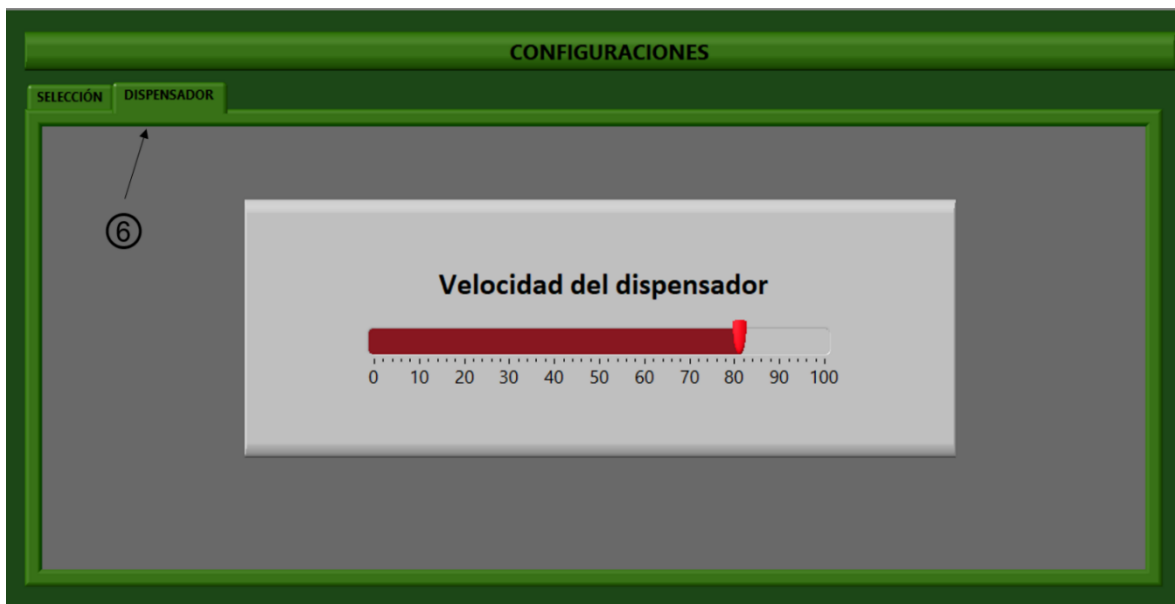


Fig. 14. HMI window for speed control of the dispenser.

IV. LIMITATIONS AND FUTURE WORK

Automated tuber grading presents specific challenges as opposed to uniformly shaped fruits or vegetables. Tubers have irregular and asymmetrical contours that make accurate measurement difficult. Differences in size and shape can exceed the parameters handled by conventional systems. Moreover, inadequate illumination can generate shadows and saturated areas, compromising the accuracy of image processing.

An important line of future work is to extend the system's classification criteria to include weight, color and surface defects such as stains, cuts or deformities. For this purpose, convolutional neural networks (CNN) can be used to identify complex characteristics in agricultural products. In addition, the system could be adapted to other foods with different shapes and properties, such as carrots, onions or fruits, thus broadening its applicability in the food industry.

In terms of algorithms, the development of predictive models to optimize product flow on the conveyor could avoid congestion and maximize operational efficiency. At the mechanical level, the design of compact or modular components would help reduce manufacturing, transportation and maintenance costs. The system could also evolve to be scalable in industrial environments. This would involve processing larger volumes of products on extended production lines. In addition, integration with Industry 4.0 technologies, such as remote

monitoring via the Internet of Things (IoT) and cloud analytics, would enable real-time monitoring of performance, automatic reporting and optimized decision making. The system could benefit from integration with data analytics techniques by studying patterns in production, such as variability in sizes or recurring defects, improving accuracy and adaptability in real time. This, combined with exploring its commercial viability as a modular package, would offer smallholder farmers the ability to customize the solution to their needs and budget, encouraging its adoption in a wider market.

V. CONCLUSIONS

The implementation of an automated potato grading system based on artificial vision has proven to be an efficient and accurate solution to optimize the sorting process of *Solanum tuberosum* in the food industry. From the results obtained, the proposed system was able to increase the grading capacity by 266.66% compared to the manual process. This has made it possible to process 26,880 kg of potatoes per week, which not only reduces operating times, but also increases the overall efficiency of the plant without the need to increase the number of workers. Due to the 266.66% increase in productivity of the grading system, an increase in the supply of yellow potatoes to the agricultural supplier is being considered, which represents a higher profit for the owners of the warehouse.

The cost-benefit analysis of the automated system highlights its positive impact in terms of productivity and error reduction. Initial costs include major components such as the camera, lighting system, motors and software development in LabVIEW™. These costs, although significant, are offset by the operational benefits generated. In addition, the 75% reduction in the error rate reduces losses associated with misclassifications. This increase in efficiency and accuracy generates significant savings in labor and operating time, resulting in a positive return on investment. This analysis reaffirms the economic viability of the system, positioning it as an accessible and cost-effective solution for the food industry.

The error rate was reduced from 2.02% in the manual process to 0.44% with the automated system. This demonstrates that the use of image processing algorithms and contour analysis is much more reliable than visual sorting by operators, eliminating subjectivity and human error due to fatigue.

The use of a high-resolution camera and a suitable lighting system allows detailed inspection of the potatoes, regardless of their irregular shape. This ensures that the system accurately detects the size of each potato, improving grading consistency.

The integration of a user interface allows real-time adjustments and provides effective safety controls. Operators can monitor and control the process without direct contact with the moving parts, reducing the risk of workplace accidents and improving working conditions. It is worth mentioning that the software does not allow the conveyor belt to be turned off without first deactivating the dispensing mechanism to prevent the conveyor belt from filling up with product when it is not working.

Although image acquisition systems can represent a high initial investment, the benefits in terms of efficiency, accuracy and reduced operating costs allow for a quick return on investment. Increased productivity, together with reduced errors and reduced labor requirements, generates a positive return for the plant.

The developed system is not only effective for potato grading but can also be adapted to other irregularly shaped products within the food industry. This opens opportunities for its implementation in other areas of the production chain, which could further increase its impact on the industry. The incorporation of machine vision technologies for food product sorting represents a step towards intelligent automation. This system proposes to improve productivity and reduce error margins, as well as optimize resource management and promote an efficient working environment.

REFERENCES

- [1] J. Yang, C. Wang, B. Jiang, H. Song, Q. Meng, "Visual perception enabled industry intelligence: state of the art, challenges and prospects," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 3, pp. 2204-2219, Mar. 2020, available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9106415>
- [2] H. Tian, T. Wang, Y. Liu, X. Qiao, Y. Li, "Computer vision technology in agricultural automation - A review", *Information Processing in Agriculture*, vol. 7, no. 1, pp. 1-19, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.09.006>
- [3] M. Javaid, A. Haleem, R. Singh, S. Rab, R. Suman, "Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture", *Sensors International*, vol. 3, pp. 1-5, May. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100132>
- [4] M. Saleem, J. Potgieter, K. Arif, "Automation in agriculture by machine and deep learning techniques: A review of recent developments", *Precision Agriculture*, vol 22, no. 6, pp. 2053-2091, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09806-x>
- [5] U. Ahmad, L. Sharma, "A review of best management practices for potato crop using precision agricultural technologies". *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, pp. 1-22, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100220>
- [6] A. Devaux, J. Goffart, P. Kromann, J. Andrade-Piedra, V. Polar, G. Hareau, "The potato of the future: opportunities and challenges in sustainable agri-food systems", *Potato Research*, vol. 64, no. 4, pp. 681-720, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09501-4>
- [7] M. Karkee, U. Bhattarai, "Applied Machine Vision Technologies in Specialty Crop Production", *Sensing, Data Managing, and Control Technologies for Agricultural Systems*, Cham: Springer International Publishing, pp. 41-73, Jun. 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-03834-1_3
- [8] J. Huo, X. Yu, "Three-dimensional mechanical parts reconstruction technology based on two-dimensional image," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 1-11, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1729881420910008>
- [9] L. Rakhmawati, W. Wirawan, S. Suwadi, C. Delpha, P. Duhamel, "Blind robust image watermarking based on adaptive embedding strength and distribution of quantified coefficients," *Expert Systems with Applications*, vol. 187, pp. 1-10, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115906>
- [10] H. Jiang, Y. Li, H. Zhao, X. Li, Y. Xu, "Parallel single-pixel imaging: A general method for direct-global separation and 3d shape reconstruction under strong global illumination," *International Journal of Computer Vision*, Vol. 129, pp. 1060-1086, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01413-z>
- [11] J. Ma, T. Czerniawski, F. Leite, "An application of metadata-based image retrieval system for facility management," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 50, pp. 1-12, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101417>
- [12] S. Gao, K. Yang, H. Shi, K. Wang, J. Bai, "Review on panoramic imaging and its applications in scene understanding," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 71, pp. 1-34, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3216675>
- [13] A. Devaux, J. Goffart, P. Kromann, J. Andrade-Piedra, V. Polar, G. Hareau, "The potato of the future: opportunities and challenges in sustainable agri-food systems," *Potato Research*, Vol. 64, no. 4, pp. 681-720, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11540-021-09501-4>
- [14] U. Ahmad, L. Sharma, "A review of best management practices for potato crop using precision agricultural technologies," *Smart Agricultural Technology*, Vol. 4, pp. 1-22, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100220>

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: MAPR; Metodología: MAPR y AJPD; Software: MAPR y AJPD; Investigación: ILCJ y AJPD; Redacción y preparación del borrador original: AJPD; Redacción, revisión y edición: MAPR y AJPD; Supervisión: MAPR; Análisis formal: ILCJ, MAPR y AJPD; Administración del proyecto: MAPR; Adquisición de fondos: MAPR y AJPD.

Financiamiento: Los autores declaran no haber recibido financiación externa.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo para la realización de este trabajo.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

Marco normativo en maniobras de libranza en la zona de operación de transmisión Puebla-Tlaxcala de la Comisión Federal de Electricidad

Regulatory Framework for Switch Off Maneuvers in the Puebla-Tlaxcala Transmission Operation Zone of the Federal Electricity Commission

José Luis **Mar Villegas**¹, Juan Carlos **Escamilla Sánchez**²

¹Comisión Federal de Electricidad, Gerencia Regional de Transmisión Central, Ciudad de Puebla, Puebla, MÉXICO

¹ORCID: 0009-0007-4458-6508 | luis.mar@ieee.org

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, MÉXICO

²ORCID: 0000-0001-6296-1702 | juan.escamillasan@correo.buap.mx

Recibido 20/11/2024, aceptado 06/01/2025.

Resumen

El presente documento de investigación expone la problemática relacionada a la falta de cumplimiento del marco normativo relacionado a las instalaciones eléctricas, el cual, pudiera desencadenar accidentes en dichas instalaciones. El objetivo del estudio es describir la secuencia general de maniobras para librar un elemento eléctrico, lo anterior, utilizando el marco normativo actual. Así mismo, dicho artículo, se llevó a cabo con un enfoque cualitativo del tipo exploratorio, porque se ha estudiado poco el tema desde el punto de vista del marco normativo. Se incluyeron los equipos eléctricos de la Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala, por lo que, se encontró una secuencia de maniobras generales que cumpliera con la teoría y el marco normativo. En conclusión, existe una secuencia de maniobras general de libranza que pueden ser aplicados para dejar sin diferencia de voltaje el elemento eléctrico.

Palabras clave: librar, maniobras, marco normativo.

Abstract

This research document exposes the problem related to the lack of compliance with the regulatory framework associated to electrical installations, which could trigger accidents in said installations. The objective of the study is to describe the general sequence of maneuvers to switch off an electrical element, the above, using the current regulatory framework. Likewise, said article was carried out with a qualitative, exploratory approach, because little has been studied on the topic from the point of view of the regulatory framework. The electrical equipment of the Puebla-Tlaxcala Transmission Operation Zone was included, therefore, a general maneuver sequence was found that complied with the theory and the regulatory framework. In conclusion, there is a sequence of general switch off maneuvers that can be applied to leave the electrical element without voltage difference.

Index terms: switch off, maneuvers, regulatory framework.

I. INTRODUCCIÓN

Desconectar un elemento eléctrico requiere varios pasos, los cuales, deben de cumplir con el marco normativo vigente. Es decir, atender los aspectos técnicos y de seguridad e higiene para evitar un riesgo que conlleve a consecuencias fatales.

El presente documento de investigación expone la problemática relacionada a la falta de cumplimiento del marco normativo relacionado a la seguridad en instalaciones eléctricas, lo cual, pudiera conllevar a accidentes en dichas subestaciones.

Chindicué-Arias y Burbano-Baena comentaron en 2021 que, en Chile, existen 62.2 muertes cada año provocado por electrocución, los cuales son causados principalmente por no cumplir con las distancias de seguridad, no considerar la tensión de contacto, falta de resguardo de las descargas atmosféricas, falta de conocimiento técnico, falta de experiencia y negligencia [1]. Bajo estas condiciones, se observa, por un lado, la falta de seguimiento de las medidas de seguridad dentro de la instalación eléctrica y por otro lado, el desconocimiento teórico aplicado en las subestaciones eléctricas.

Bravo-Herrera y Garay-Mantilla, por su parte, informaron en 2023 que, en Ecuador no han reportado accidentes relacionados con la electricidad en alta tensión, empero, identificaron riesgos de trabajo relacionados al área de actividad, iluminación, trabajos repetitivos, exceso de confianza, complicaciones intrafamiliares, trabajos en alturas, ergonomía, caídas y choques eléctricos [2]. En este sentido, propuso un plan de prevención de riesgos para la empresa pública de suministro eléctrico sin detallar los aspectos técnicos.

En México, la Comisión Nacional de Vivienda reportó que, en 2021, ocurrieron 560 muertes a causa de la electrocución [3]. Lo anterior, identificados como riesgos causados por exceso de confianza o por desconocimiento.

El propósito del presente artículo de investigación-acción-participación es, describir la secuencia general de maniobras para librar un equipo eléctrico, lo anterior, utilizando el marco normativo actual para los elementos eléctricos de la Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala (ZOTPT) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Lo cual, contribuirá a minimizar o eliminar la ocurrencia de un accidente al personal de campo.

En este sentido, se dará cumplimiento al Manual Regulatorio de Coordinación Operativa (MRCO) que se encuentra dentro del Código de Red (CdR) [4], el Capítulo 800 del Reglamento de Seguridad e Higiene de CFE Transmisión (C800-RSH) [5], Capítulo 100 del Reglamento de Seguridad e Higiene de CFE Distribución (C100-RSH) [6], así como también, otros documentos de apoyo de la industria eléctrica. Es decir, información relacionada a la teoría de la electricidad aplicada.

De acuerdo con lo anteriormente presentado, la pregunta principal que guiará a la presente investigación es: ¿Cuál es la secuencia general de maniobras para librar un equipo eléctrico en la Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala de la Comisión Federal de Electricidad?

Por lo que el objetivo general es establecer los pasos secuenciales a seguir para librar un elemento eléctrico. En este sentido, la hipótesis que guiará la presente investigación es, existe una relación significativa entre el marco normativo, la teoría y las maniobras de libranza de un equipo eléctrico.

En este sentido, para un trabajo de mantenimiento (predictivo, preventivo y correctivo) es necesario realizar la desconexión del elemento eléctrico, dichos mantenimientos se realizan en todo el territorio mexicano. Por lo que, nuestra investigación, se centrará en los equipos eléctricos de la ZOTPT en los niveles de voltaje de: 69, 115, 230 y 400 kilo Volts (kV).

Empero, no es limitativo para otros centros de control o subestaciones eléctricas fuera de la ZOTPT. Ya que, aunque está enfocado a lo particular servirá para generalizar los catálogos de maniobras de cada centro laboral involucrado con la operación física de la infraestructura eléctrica.

En este sentido, por ser un proceso de continuo cambio, el presente documento de investigación propondrá una guía general para librar un equipo eléctrico en términos técnicos y normativos para el año 2024.

Por tal motivo, este artículo tiene un impacto teórico, debido a que, con las maniobras de libranza se contribuirá para disminuir o eliminar los accidentes en los equipos eléctricos. Lo anterior, considerando lo indicado en el marco normativo y con ello, contribuirá al enriquecimiento en la literatura científica.

También, tiene un impacto práctico porque presenta los pasos efectivos a seguir para librar un equipo eléctrico que realizará el personal de campo y los operadores del centro de control del Transportista y del CENACE. Por tal motivo, beneficiará a CFE y quienes realicen trabajos de mantenimiento en elementos eléctricos.

Por otro lado, se han encontrado pocas referencias bibliográficas y actualizadas que abarque factores técnicos y normativos en México. En este sentido, para enriquecer dicha investigación, se cuenta con la ayuda

del personal de campo de la División de Distribución Centro Oriente (DDCO), de la Zona de Transmisión Puebla (ZTPUE), Zona de Transmisión Tampico, Zona de Operación de Transmisión Pachuca (ZOTPA), Zona de Operación de Transmisión Poza Rica (ZOTPTZ), del Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) de México y de catedráticos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), en Puebla, México.

Por tal motivo, esta investigación tiene la viabilidad justificada por los beneficios que aportará a la empresa y a su personal, tanto de campo como de los centros de control. En este sentido, contribuirá a evitar accidentes hacia el personal de campo.

3

II. MARCO TEÓRICO

A. Voltaje Inducido

En una línea de transporte, como elemento pasivo, transporta un flujo de corriente variante en el tiempo, desde un nodo a otro. En este sentido, por la Ley de Faraday y Ley de Lenz se induce un voltaje en aquellos elementos cercanos a dicha línea [16].

$$\mathcal{E} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (1)$$

Donde

$\mathcal{E}$ es la fuerza electromotriz.

ϕ_B es la densidad de campo o flujo magnético. El cual es $\int \vec{B} d\vec{s}$

$\vec{B}$ es el vector de campo magnético.

$d\vec{s}$ es el vector de superficie.

dt es el tiempo dado en segundos.

El voltaje inducido se define como la oposición de la variación del flujo magnético con respecto al tiempo.

B. Tensión de Contacto

Es la diferencia de voltaje establecida entre la parte metálica de la estructura y la superficie donde se encuentra una persona estando de pie y tocando dicha estructura [7].

$$E_{paso} = \left(R_B + \frac{R_f}{2}\right) I_B \quad (2)$$

Para un peso corporal de 50 kg

$$E_{paso\ 50kg} = (1000 + 1.5C_s * \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

Para un peso corporal de 70 kg

$$E_{paso\ 70kg} = (1000 + 1.5C_s * \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (4)$$

Donde

E_{paso} es la tensión de paso en volts (V).

R_B es la resistencia del cuerpo humano en ohm (Ω).

R_f es la resistencia a tierra de un pie, pero ignorando la presencia del sistema de tierra de la subestación eléctrica.

I_B es la magnitud de la corriente en RMS que pasa por el cuerpo en amperes (A).

C_s es el factor de reducción.

ρ_s es la resistividad del material superficial en ohm-metro ($\Omega - m$).

t_s es el tiempo de duración con la superficie en segundos (s).

En (2), determina el cálculo del voltaje de contacto, el cual, es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que circula por el cuerpo. Dicha proporción, está en función a la resistencia del cuerpo humano y la mitad de la resistividad superficial del terreno.

Empero, la resistencia del cuerpo humano tiene diferentes factores que modifican el grado de conductividad de este, los cuales son: piel mojada, húmeda o seca, empleo de calzado con un grado de aislamiento determinado, grado de salinidad del medio ambiente, potencial de Hidrógeno (pH), entre otros.

En (3) y (4), representan la forma de calcular el voltaje de contacto para personas con un peso de 50 y 70 kilo gramos (kg).

C. Tensión de Paso

Es la diferencia de potencial entre los pies de una persona dando un paso de un metro de distancia [7].

$$E_{paso} = (R_B + 2R_f)I_B \quad (5)$$

Para un peso corporal de 50 kg

$$E_{paso\ 50kg} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (6)$$

Para un peso corporal de 70 kg

$$E_{paso\ 70kg} = (1000 + 6C_s * \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (7)$$

Por el contrario, en (5), establece el cálculo del voltaje de contacto, el cual, es directamente proporcional a la magnitud de la corriente que circula por el cuerpo humano. Dicha proporción, está en función a la resistencia del cuerpo humano y el doble de la resistividad superficial del terreno.

En (6) y (7) presenta una forma de determinar el voltaje de paso para una persona de 50 y 70 kg respectivamente.

III. MARCO NORMATIVO

Las maniobras de libranza son, los pasos a seguir para desconectar un elemento eléctrico y dejarlo sin diferencia de voltaje para poder trabajar en su mantenimiento cumpliendo el marco teórico y de seguridad e higiene en equipos energizados, lo anterior, cuidando aspectos de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad. Por lo que, se deben de cuidar aspectos técnicos, económicos y del medio ambiente.

En este sentido, en 2021, el CdR-MRCO, en 2023, Mar-Villegas y en 2023, NFPA definieron los siguientes conceptos relacionados al mercado eléctrico, los cuales se presentan a continuación [4], [8] y [15]:

- Calidad. Es el cumplimiento de los rangos de operación del fasor de voltaje (V), frecuencia (f) y forma de onda del suministro eléctrico hacia los usuarios cumpliendo el marco normativo y técnico.
- Confiabilidad. Es la condición del Sistema Eléctrico de Potencia de suministrar la energía eléctrica bajo condiciones de suficiencia y despacho de generación cumpliendo el marco normativo y técnico.
- Continuidad. Es el suministro ininterrumpido de la energía eléctrica hacia los usuarios cumpliendo el marco normativo y técnico.

5

- Economía. Implica el suministro de electricidad al menor costo cumpliendo el marco normativo y técnico. Es decir, utilizando el despacho económico de generación con restricciones de red. Para ello, se utilizarán las centrales eléctricas más eficientes, de acuerdo con factores como: disponibilidad, restricciones ambientales, costos de producción bajos, costos de los combustibles, pérdidas (I^2R), congestiones, restricciones de red y contratos existentes que se tienen en el mercado eléctrico.
- Eficiencia. Es la capacidad de obtener los mejores resultados en los procesos productivos de la electricidad empleando la menor cantidad de recursos energéticos cumpliendo el marco normativo y técnico. El cual, permite disminuir el uso de cualquier tipo de energía y con ello, los impactos ambientales asociados a ello.
- Librar. Es dejar sin diferencia de potencial (en muerto) a un equipo eléctrico cumpliendo el marco normativo y técnico, el cual, es aislado a través de elementos de desconexión, tales como interruptores, cuchillas, fusibles, válvulas y otros dispositivos, que deberán ser bloqueados (mecánica, eléctrica y digitalmente) para evitar que accidentalmente puedan ser accionados pudiendo energizar o poner a presión. Dicha diferencia de potencial hace referencia a la parte eléctrica, vapor, agua a presión o algún otro fluido que incremente su energía potencial.
- Maniobra. Es la acción realizada por un operador (local o remoto) para cambiar el estado de un elemento eléctrico y como consecuencia de ello, del funcionamiento de la red eléctrica. Dicho operador, cumple el marco normativo y técnico para la desconexión con éxito de dicho equipo eléctrico.
- Sobrecarga. Es el exceso de la capacidad normal de operación, 100% capacidad nominal, del elemento eléctrico en un período largo de tiempo. El cual, pudiera causar una sobre-temperatura y con ello, desencadenar un cortocircuito, es decir, falla monofásica a tierra, bifásica, bifásica a tierra, trifásica, trifásica a tierra.
- Seguridad. Es la habilidad del Sistema Eléctrico de Potencia de soportar la ocurrencia de la Contingencia Sencilla Más Severa sin la operación de los Esquemas de Acción Remedial. Es decir, que pueda pasar a una nueva Condición de Estado Estable (CEE).
- Sustentabilidad. Es la utilización de fuentes de energía renovables, las cuales pueden ser convencionales o intermitentes. Es decir, fuentes de energía que pueden ser recuperables y que no se agotan con el paso del tiempo.

a. *Manual Regulatorio de Coordinación Operativa.*

En el 2021, CdR-MRCO [4] definió dicho manual como, un documento técnico-operativo, el cual, establece las reglas que deberán sujetarse quienes intervengan en la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (CdR-MRCO 1.1.2). Lo anterior, con el firme propósito de mantener la disponibilidad del elemento a ser librado, además, considerando los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad.

Personal autorizado por el centro de control

Con lo antes descrito, el personal deberá estar designado por el centro de control para efectuar las diferentes acciones en una instalación eléctrica a su cargo (CdR-MRCO 2.1 c) [4]. Con ello, a través de un curso, se certifica que el personal cuenta con los conocimientos y habilidades que brinda el presente marco normativo.

Así mismo, para realizar dichas acciones, el personal que esté involucrado en las maniobras, tanto operativa como físicamente, deberá tener un medio de comunicación directo, disponible y confiable (CdR-MRCO 2.1 d y e) [4]. Lo anterior, debido a que se debe estar informado de las condiciones que prevalecen, tanto en el centro de control como en las instalaciones eléctricas, es decir, informar si existe algún evento relevante, anomalías o riesgo para el personal de campo o la propia subestación eléctrica.

Control de diferencia de potencial (DdP)

Por otro lado, previo a la desconexión de un elemento eléctrico, se realiza un estudio de flujos de carga, lo anterior, para determinar que no se vayan a sobrepasar los límites operativos de seguridad para cada equipo eléctrico. En este sentido, respecto al control del perfil de voltaje, es conveniente utilizar los medios de compensación de potencia reactiva para mantener la diferencia de potencial dentro de los niveles establecidos por el presente código (CdR-MRCO 3.1 a) [4].

Dichos medios de compensación están relacionados al uso de los Compensadores Estáticos de Volts-Amperes-Reactivos (CEV), reactores conectados en paralelo, capacitores conectados en serie, capacitores

conectados en paralelo, posición del cambiador de derivaciones de los bancos de transformadores o autotransformadores, condensadores síncronos o el ajuste en la corriente de campo de los generadores eléctricos. Para ello, deberá haber una coordinación entre centros de control (CdR-MRCO 3.1 b) [4].

Control de flujos de potencia

De igual forma, previo a la libranza del equipo eléctrico, se realiza un estudio de flujo de carga o de potencia para verificar que no se sobrepasen los límites de funcionamiento de los equipos que se encuentran operando en tiempo real. Para ello, cuando se prevea un cambio de topología de la red eléctrica es conveniente revisar periódicamente las condiciones del SEP en su ámbito geográfico, lo anterior, para identificar posibles anomalías y en función a ello, tomar provisiones para preservar las condiciones normales de operación (estado estable) (CdR-MRCO 3.3) [4].

De cuándo solicitar licencias

En todo proceso de libranza, se tiene que hacer un análisis Técnico y Económico para determinar la disponibilidad de Transmisión y Transformación de la red eléctrica, lo anterior, para mantener cada elemento eléctrico dentro de los Límites Operativos (CdR-MRCO 5.1.1). Lo anterior, considerando la Contingencia Sencilla Más Severa (CSMS) y con ello, evitar pasar a un Estado Operativo en Alerta (EOA) o de Emergencia (EOE).

En el ámbito de las maniobras, las licencias son otorgadas para los mantenimientos predictivos, preventivos y correctivos. Es por ello, que deberán programarse y coordinarse para preservar la condición de Estado Operativo Normal (EON) (CdR-MRCO 5.1.2 a) [4], [9]. Lo anterior, para garantizar la integridad del personal de campo, de las subestaciones eléctricas y del SEP.

Gestión de solicitudes para la desconexión de un elemento

Lo anterior, considerando tener suficiente tiempo para tener la certeza que dicha licencia no afectará la condición normal de operación o alguna operación de los Esquemas de Acción Remedial (EAR) e incluso, Esquemas de Protección de Sistema (EPS) (CdR-MRCO 5.1.4 a, b y d) [4]. Lo anterior, considerando la CSMS o el criterio determinístico n-1.

Así mismo, las solicitudes de licencia estarán a nombre del responsable del equipo eléctrico, el cual, será designado por el centro de control al que pertenece la instalación eléctrica. Por lo que, llegado el día para ejecutar las maniobras, tendrá que proporcionar la siguiente información: nombre y clave de la persona; equipo eléctrico a ser librado en la subestación eléctrica, fecha y hora de inicio; fecha y hora de término, descripción de los trabajos a realizar e información adicional que contribuya a eliminar la posibilidad de error (CdR-MRCO 5.1.4 i y j) [4].

De la concesión de licencias

Cuando el solicitante es identificado por su nombre y clave asignada, se le otorga la licencia. En este sentido, con el personal de campo y del centro de control tendrán un lapso de cinco minutos para iniciar las maniobras de libranza (CdR-MRCO 5.1.9 b y c) [4]. Para ello, dicho centro de control expresará recomendaciones antes de iniciar las acciones para librar el equipo eléctrico para que tome sus precauciones pertinentes a su alcance. Dichas acciones, se expresarán de manera clara y concisa, expresando con precisión la nomenclatura del elemento eléctrico.

De las maniobras para licencia

Las maniobras deben estar contenidas y actualizadas en un catálogo para cada elemento eléctrico de la subestación, dichos pasos, deberán estar de acuerdo a los criterios de seguridad y confiabilidad establecidos por el CENACE y deberá contener los siguiente: título del elemento, maniobras para desconectarlo y dejarlo sin diferencia de tensión; maniobras de normalización para reconectarlo, actividades previas para salvaguardar la integridad del personal y maniobras especiales que pudieran tener (CdR-MRCO 5.1.11 a y b) [4].

De las tarjetas auxiliares

Una vez librado el equipo eléctrico, tanto el personal de campo como el centro de control deberá colocar tarjetas auxiliares rojas, bloqueos mecánicos, bloqueos eléctricos o digitales en los controles (telemandos) de interruptores y cuchillas (CdR-MRCO 5.1.12 a) [4]. Es decir, para evitar que, accidentalmente se accionen los controles sobre equipo que esté librado.

Del retiro de licencias y puesta en servicio del equipo

Cuando se concluya el mantenimiento de un equipo eléctrico y este, se encuentre disponible para realizar las maniobras para reconectar dicho equipo, se deberá solicitar el retiro de las licencias asociadas a ese elemento y solicitar al centro de control el retiro de la licencia y comenzar las maniobras de normalización en presencia de quienes intervinieron en el mantenimiento (CdR-MRCO 5.1.14 a y c) [4]. Lo anterior, para estar al tanto de las maniobras y prever una anomalía en las secuencias de dichos pasos.

Para el retiro de las licencias, el personal de campo deberá proporcionar lo siguiente: nombre del poseedor de la licencia, número de la licencia, identificación del elemento eléctrico, quién la retira, confirmación del retiro de medio de protección que haya colocado, proporcionar información relevante del mantenimiento, dar porcentaje de avance y otras observaciones relevantes (CdR-MRCO 5.1.14 d) [4]. Lo anterior, se realiza para garantizar la operación en estado estable del equipo eléctrico.

De la información disponible en la subestación eléctrica

En una instalación eléctrica, se debe tener copia de toda la información relacionada a la subestación, esto es, del área de subestaciones, protecciones, control, comunicaciones, entre otros. Es decir, diagramas unifilares, diagrama de protecciones, manual de operación, catálogo de maniobras, diagramas de comunicaciones, diagrama de control, números telefónicos y demás información relevante (CdR-MRCO 5.2.2) [4].

De quien debe efectuar las maniobras

Las maniobras de libranza son realizadas por personal designado y autorizado, es decir, el personal de campo contará con el conocimiento de su equipo eléctrico para la ejecución de las maniobras, tanto el que las ejecuta como el que las ordena. Lo anterior, considerando un conocimiento teórico, práctico y de experiencia comprobada.

Por tal motivo, el operador del CENACE estará supervisando y coordinando operativamente la Red Nacional de Transmisión (RNT) y Redes Generales de Distribución (RGD); y finalmente, el operador de la RNT y las RGD estarán supervisando y operando físicamente los equipos eléctricos en la ejecución de las maniobras (CdR-MRCO 5.2.3) [4]. Empero, es necesario que las partes involucradas cuenten con toda la información actualizada para la ejecución confiable de las maniobras.

De la ejecución de las maniobras

Una vez cotejada la información, el centro de control dictará las maniobras vía voz al personal de campo, de manera clara y precisa, para ello, se utilizará la nomenclatura asignada al elemento eléctrico a ser librado, finalmente, el personal de campo repetirá las maniobras que ejecutará como una medida de confirmación (CdR-MRCO 5.2.5 a) [4]. Con esta acción, se ratifica que se haya entendido la secuencia de pasos para desconectar el equipo eléctrico.

Empero, si hubiere alguna discrepancia en los pasos de las maniobras, el personal de campo tendrá la obligación de hacer notar la diferencia encontrada hacia el operador del centro de control (CdR-MRCO 5.2.5 b) [4]. Bajo este escenario, tanto el centro de control como el personal de campo analizarán y acordarán los nuevos pasos de las maniobras cuidando la integridad del personal, de la subestación eléctrica y del SEP.

En este sentido, las maniobras se realizarán hasta que no haya duda por ambas partes, de lo contrario, se tendrá que aclarar cualquier duda antes de la ejecución de las maniobras (CdR-MRCO 5.2.5 c) [4]. Bajo ese escenario, la secuencia de maniobras se realizaría un paso a la vez, con ello, se evitaría un posible error debido a la nueva maniobra que se esté realizando.

Por otro lado, cuando se están realizando los pasos de las maniobras puede ocurrir una anomalía en los diferentes dispositivos asociados que desconectan el elemento, como es el caso de fallas de cuchillas o falla en la bobina de disparo de un interruptor, entre otros. Por lo que, si el personal detecta alguna condición anormal tendrá que comunicarlo inmediatamente y analizar si es posible continuar o de lo contrario cancelar las maniobras hasta que se corrija el desperfecto (CdR-MRCO 5.2.5 d) [4].

De igual forma, un signo de verificar el correcto funcionamiento de los medios de desconexión es, la revisión del cambio de posición y bloqueos de dichos medios. En este sentido, el personal de campo deberá confirmar los cambios de estado cuando se envíe un telemando desde el centro de control o la caseta de control (CdR-MRCO 5.2.5 f) [4].

Adicionalmente, para evitar la operación errónea de los dispositivos antes mencionados, el personal de campo deberá realizar varias acciones precautorias. Dichas acciones son: desconectar la alimentación de las bobinas de cierre, el cierre de válvulas de tuberías de aire, bloqueo y desacople de mecanismos; o alguna otra acción para evitar la operación de interruptores y cuchillas; finalmente revisar la ausencia de voltaje para posteriormente colocar su equipo personal de puesta a tierra (CdR-MRCO 5.2.5 g) [4].

Además de lo anteriormente expuesto, con la libranza del elemento eléctrico, existen equipos relacionados que puedan operar de manera errónea, por lo que se tendrán que tomar algunas disposiciones para evitar que suceda. Tal es el caso del bloqueo de la protección diferencial, Buchholz, transferencias automáticas, automatismos, EAR o algún otro tipo de bloqueo (CdR-MRCO 5.2.5 h) [4].

8

Aunado a lo anterior, el personal de campo deberá colocar tarjetas auxiliares en manuales y conmutadores; así mismo, el operador del centro de control deberá colocar etiquetas e inhabilitar telemandos desde los controles del Sistema de Administración de Energía (EMS, *Energy Management System*) (CdR-MRCO 5.2.5 i) [4]. Lo anterior, se realiza para evitar energizar el elemento eléctrico accidentalmente.

En este sentido, el personal de campo seguirá las medidas de seguridad industrial, así como también, cuidando las particularidades de cada subestación eléctrica. Es decir, deberá de cumplir las normas de seguridad vigentes en todo momento (CdR-MRCO 5.2.5 j) [4], [5].

Al respecto, dicho personal, deberá tener la precaución de verificar que el equipo eléctrico sea el que se va a maniobrar (CdR-MRCO 5.2.5 k) [4]. Por lo que, deberá estar ubicado en frente de los dispositivos que desconectan el elemento eléctrico y cotejar, a través de la nomenclatura, que realmente se trate de dicho elemento.

Lo anterior, es debido para prevenir alguna desconexión errónea de algún equipo eléctrico con nomenclatura similar. Por lo que deberá estar al tanto de este aspecto en todo instante mientras se encuentre ejecutando las maniobras de libranza.

Del aprovechamiento y coordinación operativa

El CENACE es el encargado de autorizar el inicio de maniobras de libranza de un elemento eléctrico asociada a la licencia otorgada con anterioridad, por lo que, deberá de coordinar a los operadores de los diferentes centros de control hasta que el equipo eléctrico se quede sin diferencia de tensión (CdR-MRCO 5.4 d) [4]. Lo anterior, cuidado las medidas de seguridad para el personal de campo, la subestación eléctrica y del SEP.

Los operadores de la RNT y RGD son quienes coordinarán al personal de campo autorizado de forma directa, utilizando los diferentes medios de comunicación, por lo que, los operadores antes mencionados deberán estar autorizados por el operador del CENACE para comenzar las maniobras (CdR-MRCO 5.4 g, j e i) [4]. Lo anterior, para garantizar una condición en estado estable del SEP, por lo que deberá haber una coordinación entre los diferentes centros de control y el CENACE.

Un caso muy especial son los bancos de transformadores o autotransformadores, ya que, son los que suministran la energía hacia los diferentes usuarios. En este sentido, para la libranza de dichos bancos, el Transportista y el Distribuidor deberán acordar el día en que se podrá librar el banco para evitar alguna afectación (CdR-MRCO 5.4 m). Es por ello que, se deberá hacer un análisis de dónde se podrá transferir la carga para evitar alguna afectación hacia los usuarios.

b. Manual de Programación de Salidas.

El presente manual (MPS), establece los criterios que deberá observar el CENACE para la programación de las salidas a mantenimiento de mediano plazo para el otorgamiento de las licencias a los elementos eléctricos y equipos asociados [9]. Lo anterior, para los participantes de mercado, Transportista y Distribuidor.

De las Licencias

Las maniobras que sean complicadas o especiales que pudieran provocar una salida del estado estable de la red eléctrica, deberán estar acompañadas de un estudio técnico donde describa detalladamente los trabajos a realizar y qué condiciones operativas se requerirán para mantener su condición normal de operación (MPS 4.2.3) [9]. Para ello, se realizarán estudios de flujos de carga considerando la CSMS (n-1).

En este sentido, las licencias se otorgarán de acuerdo con lo establecido por el CdR (MPS 4.2.7) [9]. Lo anterior, cumpliendo los criterios de: eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad.

Sin embargo, el CENACE no podrá otorgar la licencia a causa de situaciones ambientales adversas que pudieran afectar la confiabilidad del SEN, las cuales son: sismos, erupciones volcánicas, incendios, tormentas geomagnéticas, tornados, huracanes, eventos sociales, entre otros (MPS 5.1.8 a). En esas situaciones, no se podrá iniciar con las maniobras de libranza del equipo eléctrico.

c. *Capítulo 800 y 100: Reglamento de Seguridad e Higiene, Transmisión y Distribución.*

- o El presente reglamento, establece los requisitos relevantes que deberá cumplir todo personal que realiza una función operativa en materia de Seguridad e Higiene en todo centro laboral [5].

Responsabilidad de la seguridad

Antes de la ejecución de las maniobras de libranza de un elemento eléctrico, se deben planear todas las maniobras atendiendo las reglas de seguridad y los procedimientos establecidos a través de la Reunión de Inicio de Jornada (RIJ) y la Reunión de Inicio de Maniobras (RIM) (C800-RSH secc. 802 b – 1, 2 y 5) [5] y (C100-RSH secc. 102 a – 1, 2 y 6) [6]. Lo anterior, considerando tener la documentación actualizada de la subestación eléctrica.

Asimismo, como un complemento a lo antes descrito, existe el procedimiento de Supervisiones Efectivas, el cual instruye a seguir cabalmente las RIJ y las RIM, lo anterior, para obtener un objetivo de cero accidentes fatales y reducción de incapacidades permanentes [10]. Por lo que, es indispensable que el supervisor de los trabajos documente tanto la RIJ como la RIM.

Así como también, escribir el número alfanumérico asignado por el CENACE, al personal involucrado en el mantenimiento que haya tomado el curso del CdR-MRCO actualizado [10]. Lo anterior, para quienes hayan participado en el mantenimiento del elemento eléctrico. Por tal motivo, es indispensable tener supervisión en todo momento.

Planeación y supervisión del trabajo

Así mismo, en la planeación de las maniobras todo personal deberá reunirse periódicamente para identificar los peligros y con ello, poder identificar y aplicar las medidas de seguridad para evitar algún accidente (C800-RSH secc. 803 a – 1 y 3) [5] y (C100-RSH secc. 102 1 – a, b y c; 2) [6]. Para ello, se debe hacer una revisión de los procedimientos, herramientas, materiales, equipos, aparatos de comunicación y una revisión general en el área de trabajo donde realizarán las maniobras.

También, previo a la libranza, el personal de campo realizará una inspección de las condiciones estructurales, ambientales, mecánicas y eléctricas (C800-RSH secc. 803 d – 1) [5] y (C100-RSH secc. 103 a – 1) [6]. Lo anterior, prestando atención a la nomenclatura oficial del elemento eléctrico otorgado por CENACE, además, supervisados por su jefe inmediato superior.

Experiencia y capacidad de los trabajadores

Para trabajos dentro de las subestaciones eléctricas, donde se encuentren equipos energizados deberá estar personal con experiencia y conocimiento sobre el funcionamiento de cada equipo involucrado a ser librado (C800-RSH secc. 804 a – 1, 2, 3, 5, 12 y 14) [5] y (C100-RSH secc. 104 a - 1, 2, 3, 5, 13 y 15) [6].

Lo anterior, porque en una subestación eléctrica cuando se libra un elemento eléctrico aún quedan energizados los equipos restantes, por lo que, se deberá tener mayor precaución cuando se esté laborando dentro de las instalaciones guardando sus distancias de seguridad.

En este sentido, el decir personal con experiencia, no se debe confundir con un exceso de confianza, sino que debe de seguir fehacientemente los procedimientos y la secuencia de maniobras de libranza de manera correcta, sin subestimar los riesgos inherentes a cada dispositivo eléctrico (C800-RSH secc. 804 e – 1 y 2) [5] y (C100-RSH secc. 104 c – 1 y 2) [6]. Lo anterior, debido a que se debe mantener la distancia de seguridad entre las partes energizadas y el personal que realiza la maniobra o trabajos asignados.

Equipo de protección personal

Por otro lado, es importante que el personal de campo cuente con su equipo de protección personal y en buenas condiciones, ya que, de lo contrario, no podrá realizar maniobra alguna. Lo anterior, porque estarán trabajando en equipo energizado y en él, estarán realizando maniobras de libranza o de normalización (C800-RSH secc. 807 a, b, c, d, g y h) [5] y (C100-RSH secc. 107 a, b, c, d, g, h, i, j, k, l y q) [6].

Dichas maniobras, podrían ser: apertura o cierre de interruptores y después, de cuchillas lado línea y lado barra; cierre o apertura de cuchillas de puesta a tierra, utilización de voltímetros o amperímetros para medición, entre otras.

Trabajos en alturas

Cuando se realizan maniobras de libranza de un elemento eléctrico como es el caso de los bancos de capacitores (serie o paralelo) o los divisores de potencial capacitivos, adicionalmente al cierre de cuchillas o instalación del Equipo Personal de Puesta a Tierra (EPPT), se deben utilizar las cuchillas de descarga de dicho banco (C800-RSH secc. 809 a - 8) [5] y (C100-RSH secc. 109 no toca el tema) [6]. Lo anterior, para drenar la energía contenida en tal dispositivo, así como esperar el tiempo recomendado por el fabricante para el drenado de dicha energía.

Por otro lado, respecto a las Trampas de Onda, es primordial cerciorarse que esté conectada a tierra dicha trampa y su equipo de acoplamiento (C800-RSH secc. 809 a - 9) [5] y (C100-RSH secc. 109 no toca el tema) [6]. Debido a que, si por alguna razón la trampa de onda no cuenta con su conductor a tierra, se podría establecer una diferencia de tensión entre dicha trampa y tierra, lo cual, pudiera provocar un accidente con el personal que estuviera trabajando en el equipo.

Otro tema que tratar es la manipulación de los interruptores y cuchillas (lado fuente y carga) en la apertura de estos, estos dispositivos de desconexión se debe asegurar el bloqueo eléctrico o mecánico para evitar un cierre accidental de los mismos (C800-RSH secc. 809 a - 10) [5] y (C100-RSH secc. 109 no toca el tema) [6]. Además, el bloqueo se realiza digitalmente desde el centro de control quien tiene el telemando y en la subestación; se desconecta la alimentación eléctrica del control, se cierran válvulas (neumáticas o hidráulicas), entre otros medios que impidan la operación errónea de dichos dispositivos.

Por otro lado, cuando se realicen trabajos en la parte des-energizada de las cuchillas, se deberá colocar equipo de puesta a tierra en ambos extremos de las cuchillas (C800-RSH secc. 809 a - 11) [5] y (C100-RSH secc. 109 no toca el tema) [6]. Esto se realiza, por seguridad del personal y con ello, establece un camino de la corriente eléctrica por alguna energización accidental del equipo eléctrico.

Distancias de seguridad respecto a partes energizadas.

Al estar en una subestación eléctrica, es necesario poner atención de cómo se realizará la maniobra, sin embargo, previo al inicio es primordial identificar el equipo a través de su nomenclatura, sus equipos asociados y qué elementos energizados se encuentran cerca de él (C800-RSH secc. 810 a) [5] y (C100-RSH secc. 110 a) [6].

Así mismo, cuando un elemento eléctrico se libra, se debe aterrizar con el equipo personal de puesta a tierra y en cortocircuito en cada una de las fases, lo anterior, en ambos extremos donde vaya a trabajar el personal, claro, siempre y cuando se respeten las distancias de seguridad en equipos energizados cercanos a la libranza (C800-RSH secc. 810 b y d) [5] y (C100-RSH secc. 110 b y d) [6]. Lo que precede, para drenar el voltaje inducido en los elementos eléctricos y además, como medio de protección cuando se energice accidentalmente el elemento.

Además, una de las prácticas que se utilizan cuando se realizan trabajos en campo es, considerar que mientras que no se instale un equipo personal de puesta a tierra se considerará energizado el equipo asociado al elemento librado. En este sentido, las partes metálicas se considerarán energizadas hasta que no haya un equipo de puesta a tierra instalado, de lo contrario, se colocarán barreras para evitar los contactos accidentales (C800-RSH secc. 810 c) [5] y (C100-RSH secc. 110 c) [6].

Asimismo, para conectar el equipo personal de puesta a tierra y cortocircuitar el elemento eléctrico es necesario mantener las distancias de seguridad en tanto que esos elementos no hayan sido conectados a tierra (C800-RSH secc. 810 d, e, f, g, h e i) [5] y (C100-RSH secc. 110 d, e, f, g, h e i) [6]. En este sentido, posterior a la instalación del equipo personal de puesta a tierra, se utilizan voltímetros y amperímetros para garantizar la ausencia de voltaje y corriente eléctrica respectivamente.

Al respecto, al trabajar en elementos desenergizados, invariablemente se conectará el equipo personal de puesta a tierra y cortocircuitará dicho elemento, lo anterior, lo más cercano posible al punto de trabajo (C800-RSH secc. 812 a – 1 y 2) [5] y (C100-RSH secc. 112 a – 1 y 2) [6]. Al respecto, existe una regla general la cual indica que, si no está aterrizado el equipo, entonces, está energizado.

Empero, previo a la colocación de los equipos personales de puesta a tierra es necesario cerciorarse que la apertura de interruptores y cuchillas sea de manera física, después, verificará ausencia de DdP, se cerrarán las cuchillas de puesta a tierra y finalmente se instalará el equipo personal de puesta a tierra provisional, pero cortocircuitando las tres fases (C800-RSH secc. 812 a – 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11) [5] y (C100-RSH secc. 112 a – 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11) [6]. Estos pasos se realizan secuencialmente con el fin de evitar un accidente en la subestación eléctrica.

Si por alguna razón, la estructura de la subestación o equipo primario no estuviera aterrizado a la red de tierras, deberá aterrizar dicha estructura (C800-RSH secc. 812 a – 12 y 14) [5] y (C100-RSH secc. 112 a – 12) [6]. En este sentido, el personal de campo deberá poner atención que todo el cable de puesta a tierra deberá estar conectado a la misma red de tierras, con ello, se garantiza no tener una diferencia de tensión entre redes de tierras independientes.

Otro tema donde hay que poner atención es, cuando en un elemento eléctrico existen dos o más trabajadores laborando en diferentes puntos, por lo que, es necesario que cada personal coloque y retire su equipo personal de puesta a tierra (C800-RSH secc. 812 a – 13 y 15) [5] y (C100-RSH secc. 112 a – 14 y 16) [6]. Así mismo, cada trabajador, tendrá que reportar al coordinador o responsable de los trabajos que concluyó sus trabajos, retiró su equipo de puesta a tierra personal, revisó que no existieran objetos extraños y que el equipo está disponible en el punto donde trabajó.

Trabajos en subestaciones eléctricas

Dentro de una subestación eléctrica, todo equipo primario, secundario y demás dispositivos, se considerarán energizadas hasta que no se compruebe lo contrario (C800-RSH secc. 813 a – 3) [5] y (C100-RSH secc. 113 a – 2) [6]. Lo anterior, porque hay que considerar el voltaje inducido por los elementos energizados, por lo que, es necesario considerar el voltaje de paso y el contacto; así como también, no existan sistemas de tierra independiente para evitar una diferencia de potencial que vaya a lesionar al personal de campo.

Además, cuando exista producción de humo, ya sea por una falla eléctrica o por un incendio causado deliberadamente, se deberá tomar las precauciones para reducir o eliminar la emisión de dicho humo. Ya que, el humo favorece la conducción eléctrica, por tal motivo, se deberá tomar las previsiones en equipo energizado cercano al elemento librado, ya que, puede provocar una desconexión por falla del equipo (C800-RSH secc. 813 a – 15) [5] y (C100-RSH secc. 113 no toca el tema) [6].

Por otro lado, cuando haya personal en ambos extremos de una línea de transmisión para realizar trabajos, deberá estar un personal responsable de la licencia, así como también, un supervisor (C800-RSH secc. 813 a – 16) [5] y (C100-RSH secc. 113 a – 14) [6]. Asimismo, en cada extremo, se realizará una revisión de las maniobras necesarias para librar dicho elemento y habrá comunicación entre los supervisores colocados en cada subestación eléctrica.

Además, cuando se labore cerca de equipos energizados se deberá realizar una inspección si aquellos equipos cuentan con las protecciones eléctricas habilitadas (C800-RSH secc. 813 a – 18) [5] y (C100-RSH secc. 113 no toca el tema) [6]. Lo anterior, se tiene que revisar tanto en la subestación eléctrica como en el centro de control quien tiene el telemando.

Otro aspecto, es revisar las condiciones estructurales, mecánicas y eléctricas, lo anterior, para tomar disposiciones y evitar accidentes (C800-RSH secc. 813 b – 1) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 1) [6]. Es decir, cuando se ingresa a una subestación eléctrica se debe hacer una inspección visual en toda la subestación antes y después de cualquier maniobra.

Al respecto, se ratifica la correcta conexión a tierra de las diferentes partes metálicas, lo anterior, utilizando equipo dieléctrico como los guantes, botas, tapetes, entre otros (C800-RSH secc. 813 b – 2 y 3) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 2 y 3) [6]. Por lo que, se debe tener en mente la tensión de contacto, la tensión de paso y las diferencias de tensión entre conductores de puesta a tierra y la red de tierras de la propia subestación.

Por otro lado, previo al inicio de maniobras, se debe corroborar que estén actualizados los procedimientos, el diagrama unifilar y la nomenclatura oficial asignada por el CENACE (C800-RSH secc. 813 b – 6) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 5) [6]. Lo cual, deberá ser confirmado con el operador del centro de control correspondiente.

En la ejecución de las maniobras de cierre y apertura de cuchillas de puesta a tierra, se debe tener cuidado al estar accionando dichas cuchillas, ya que, deberá asegurarse que el equipo eléctrico esté desenergizado (C800-RSH secc. 813 b – 9) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 5) [6]. Por lo que, antes de cerrar dichas cuchillas se verificará ausencia de corrientes y diferencia de voltaje por fase y; entre fases; asimismo, asegurar que ni el interruptor y cuchillas del elemento se vayan a cerrar accidentalmente.

Lo indicado en el párrafo anterior quiere decir que, realizar la siguiente secuencia de maniobras para un equipo eléctrico: abrir el interruptor, verificar la ausencia de corrientes por fase, bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento del interruptor; abrir las cuchillas (lado bus y equipo), bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas; verificar la ausencia de diferencia de voltaje entre fases y de fase a neutro; cerrar la cuchillas de puesta a tierra, bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas y finalmente, instalar el equipo personal de puesta a tierra en ambos extremos del lugar donde estará trabajando el personal.

Otro punto que hay que tomar en cuenta es el capacitor, elemento pasivo, el cual almacena energía eléctrica y ello, nos lleva a tener más cuidado en su manejo. Ya que, debe garantizar el drenado de esta energía y mantener un valor de cero volts y amperes para evitar un accidente.

Por lo que, antes de realizar el mantenimiento de capacitores se deberá realizar lo siguiente: abrir el interruptor, verificar la ausencia de corrientes por fase, bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento del interruptor; abrir las cuchillas del interruptor (lado bus y equipo), bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas; verificar la ausencia de diferencia de voltaje entre fases y de fase a neutro; cerrar cuchillas de descarga para cortocircuitar cada fase; cerrar la cuchillas de puesta a tierra, bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas y finalmente, instalar el equipo personal de puesta a tierra en ambos extremos del lugar donde estará trabajando el personal (C800-RSH secc. 813 b – 13) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 21) [6].

Un punto a destacar es que, existen bancos de capacitores con y sin conexión a tierra (neutro flotante) (C800-RSH secc. 813 b –15) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 21) [6]. En tal situación, se deberá revisar y conectar, de ser necesario, a tierra en caso de tener un neutro flotante, posteriormente, se deberá retirar dicha conexión a tierra para entregar el equipo para su operación.

Por otro lado, existen capacitores en: divisores de potencial, interruptores de alta tensión y en boquillas del tipo capacitivo (C800-RSH secc. 813 b –16) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 22) [6]. Por lo que, antes de iniciar sus trabajos de mantenimiento, se tendrán que colocar los equipos de puesta a tierra para drenar la energía de este elemento pasivo.

Asimismo, en caso de que los trabajos de mantenimiento contengan manipulación de los apartarrayos, estos deben ser conectados a tierra en ambos extremos del dispositivo posterior a las maniobras de libranza (C800-RSH secc. 813 b –18) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 9) [6]. Lo anterior, se refiere a que los apartarrayos presentan una alta impedancia ante frecuencias de operación (60 Hz) y una baja impedancia con altas frecuencias para poder drenar la energía transferida por un rayo o descarga atmosférica.

También, para los transformadores con conexión del neutro a tierra para el monitoreo del voltaje de secuencia cero (V^0), se debe aterrizar adicionalmente al uso del equipo personal de puesta a tierra provisional que aterriza el equipo principal (C800-RSH secc. 813 b –30) [5] y (C100-RSH secc. 113 no toca el tema) [6]. Con ello, se garantiza que no existan voltajes en equipo bajo licencia.

Además, en cables subterráneos con material de Polietileno de Cadena Cruzada (XLPE, *Cross Linked Polyethylene*) se debe tener cuidado de estar aterrizado, de manera firme, la pantalla (cinta) conductora o semiconductora para evitar una DdP a valores peligrosos (C800-RSH secc. 813 b –31 y 32) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 20) [6]. Lo anterior, porque se puede desconectar el equipo de puesta a tierra por movimiento de cada abrazadera.

Por otro lado, para trabajar en barras o buses librados donde se cuente con transformadores o dispositivos de potencial, estos tendrán que retirarse los fusibles lado secundario (baja tensión), lo anterior, para evitar un

retorno de voltaje desde el lado secundario hacia el primario (C800-RSH secc. 813 b –34) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 19) [6]. Posteriormente, se reinstalarán dichos fusibles para dejarlo disponible.

De igual forma, cuando se realicen movimientos al cambiador de derivaciones (Tap's) sin carga del banco de transformadores de potencia y distribución, dicho banco, deberá estar librado (C800-RSH secc. 813 b –36) [5] y (C100-RSH secc. 113 no toca el tema) [6]. Lo anterior, porque el personal de campo tiene que acercarse a la parte energizada de la relación de transformación y realizar el movimiento hacia arriba o abajo de dicho cambiador de manera manual.

Por lo anterior, se tiene que realizar la siguiente secuencia de maniobras para un equipo eléctrico: abrir los interruptores, verificar la ausencia de corrientes por fase, bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de cada interruptor; abrir las cuchillas (lado *bus* y equipo), bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas; verificar la ausencia de diferencia de voltaje entre fases y de fase a neutro; y finalmente, instalar el equipo personal de puesta a tierra en ambos extremos del lugar donde estará trabajando el personal.

Además, en trabajos para aquellas líneas de transmisión donde se tenga una transición aéreo-subterránea, se debe prestar atención sobre la verificación de ausencia de diferencia de voltaje para posteriormente, aterrizar las mufas, cables de potencia, boquillas, etcétera (C800-RSH secc. 813 b –38) [5] y (C100-RSH secc. 113 b – 20) [6]. Lo anterior, se realiza para evitar el voltaje inducido en los cables de potencia.

También, el personal responsable de los trabajos deberá tener capacitación y experiencia de acuerdo a su perfil del puesto en la CFE y en CdR-MRCO del CENACE (C800-RSH secc. 819 a) [5] y (C100-RSH secc. 119 b) [6]. Por lo anterior, es conveniente estar actualizado en los cursos asociados al perfil del puesto y del CdR-MRCO.

También, previo al inicio de maniobras los trabajadores que vayan a realizar las maniobras de libranza del elemento eléctrico, es importante revisar las condiciones climatológicas, ya que, si está lloviendo o comienza a llover no se podrán realizar las maniobras (C800-RSH secc. 819 a) [5] y (C100-RSH secc. 119 c) [6]. Por lo que, bajo esta condición, se cancelarán o suspenderán los trabajos según sea el caso, hasta que nuevamente sean restablecidas a las condiciones normales para continuar con las maniobras.

IV. METODOLOGÍA/DESARROLLO

La presente investigación fue llevada a cabo con un enfoque cualitativo del tipo exploratorio. Lo anterior, porque se ha estudiado poco el tema desde el punto de vista del marco normativo.

Así mismo, se utilizó el método inductivo, ya que, los resultados particulares contribuyeron a elaborar una secuencia de maniobra general. Por otro lado, la técnica utilizada para obtener la información es a través de análisis de documentos relacionados a las maniobras, como los del CENACE [11].

Por otro lado, en relación con el contexto de la investigación, la presente se llevará a cabo en la ZOTPT de los diferentes elementos eléctricos para obtener una maniobra general de libranza [12].

Dicho centro de control cuenta con seis zonas de distribución pertenecientes a la División de Distribución Centro Oriente (DDCO) y una más asignada a la División de Distribución Sureste (DDSE) [11]. Por lo que, la ZOTPT cuenta con 136 subestaciones eléctricas y 136 líneas de transmisión, la cual, la tomamos como población para el presente artículo de investigación.

Así mismo, es un diseño de estudio de caso, ya que, se utilizará la teoría y el marco normativo en la elaboración de los pasos para la libranza de un equipo eléctrico. Lo anterior, mediante una revisión de la bibliografía y análisis de bibliografía sobre estudios de caso.

Es decir, se definió y esquematizó detalladamente los pasos a seguir para librar un elemento eléctrico en la ZOTPT.

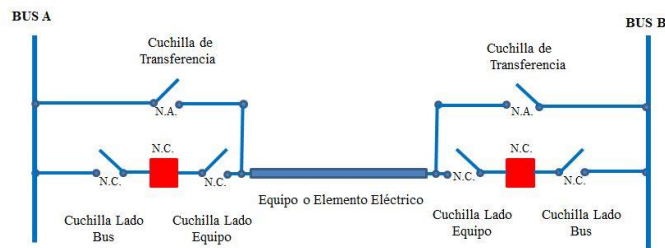


Fig. 1. Diagrama unifilar de un equipo eléctrico.

La figura 1, presenta un equipo o elemento eléctrico con sus medios de desconexión de manera general. Dicho equipo eléctrico, cuenta con dos interruptores en ambos extremos de dicho elemento.

Además, cada interruptor, cuenta con cuchillas lado *bus* y equipo, así como también, una cuchilla de transferencia. Las cuales, ayudan a aislar completamente al equipo eléctrico.

a. *Maniobras de Libranza para dejar sin DdP al Equipo Eléctrico.*

A continuación, se describirá el proceso de libranza de un equipo eléctrico. En este sentido, en 2022, Mar-Villegas comentó que, la toma de decisiones en el sector eléctrico debe basarse en información, identificación de anomalías, análisis de las variables y determinar la mejor alternativa [13].

Para ello, en 2024, Mar-Villegas propuso una secuencia de maniobras cumpliendo aspecto del marco normativo y técnico [14]. Lo anterior, relacionado a la seguridad e higiene en instalaciones eléctricas y el funcionamiento de los elementos eléctricos.

Por tal motivo, dichas disposiciones podrán desencadenar situaciones favorables, pero también, desfavorables si no se siguen de manera secuencial. Por lo que, previo a la libranza, se tienen que realizar algunas verificaciones, mismas que se describirán a continuación.

El responsable de cada subestación eléctrica y su personal, verificarán lo siguiente:

1. Condiciones ambientales favorables.
 2. Comunicación directa, confiable y disponible.
 3. No haya anomalías en equipos de la subestación y del elemento eléctrico a ser librado.
 4. Actualizado el catálogo de maniobras y que coincida con el operador del centro de control del Transportista.
 5. Actualizados los diagramas unifilares.
 6. Actualizados los diagramas de protecciones.
 7. Actualizados los diagramas de control.
 8. Actualizado los diagramas de comunicaciones.
 9. La nomenclatura del equipo eléctrico que se librará.
 10. Que las cuchillas de transferencia (*by-pass*) estén en posición abiertas y bloqueadas.
 11. Si existe alguna licencia en el elemento a ser librado con el operador del centro de control del Transportista.
- Continúa la secuencia normal
12. El operador del centro de control del Transportista verificará que se encuentre el responsable de los trabajos en la subestación o donde vaya a realizar el mantenimiento (punto de trabajo) y que cuente con su número alfanumérico otorgado por el CENACE relacionado para otorgar licencias.

15

13. El operador del centro de control del Transportista anotará el número consecutivo de la Reunión de Inicio de Maniobra.
14. El operador del centro de control del Transportista anotará el nombre del supervisor de los trabajos.
15. El responsable de cada subestación eléctrica y su personal, junto con el operador del centro de control del Transportista verificarán la secuencia de maniobras.
16. Responsable de los trabajos de cada punto laboral solicitará al operador del centro de control del Transportista la licencia del elemento eléctrico a ser librado.
17. El operador del centro de control del Transportista solicitará al operador del CENACE la licencia para comenzar con las maniobras de libranza.
18. El operador del CENACE verificará en tiempo real, a través del análisis de flujos de carga, no sobrepasar los límites operativos en la red eléctrica con la libranza del elemento. Dicho análisis, hace referencia al resultado de flujos de potencia sin considerar el equipo eléctrico librado (criterio n-1).
19. El operador del centro de control del Transportista recibirá la licencia correspondiente al equipo eléctrico a ser librado por parte del operador del CENACE.
20. El operador del CENACE autorizará el inicio de maniobras al centro de control del Transportista.
21. El operador del centro de control del Transportista informará de la licencia e inicio de maniobras al responsable de cada subestación eléctrica.
El operador del centro de control del Transportista bloqueará los siguientes controles:
22. Los Esquemas de Acción Remedial, de ser necesario.
23. Los Esquemas de Protección de Sistema, de ser necesario.
24. Las Transferencias Automáticas, de ser necesario.

Continúa la secuencia normal.

25. El operador del centro de control del Transportista informará al responsable de cada subestación eléctrica que enviará el telemando de apertura a cada interruptor, de manera alternada.
26. El responsable de cada subestación eléctrica verificará físicamente e informará la apertura de cada interruptor.
27. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica verificar ausencia de corrientes en cada fase del interruptor.
28. El responsable de cada subestación eléctrica verificará e informará la ausencia de corrientes en cada fase del interruptor.
29. El operador del CENACE y del centro de control del Transportista supervisarán los perfiles de voltaje y flujos de potencia.
30. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento del interruptor de cada subestación.
31. El responsable de cada subestación eléctrica informará sobre el bloqueo realizado.
32. El operador del centro de control del Transportista inhibirá y colocará tarjetas auxiliares rojas en los telemandos asociados al interruptor y demás controles asociados al elemento eléctrico de cada subestación.
33. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica abrir las cuchillas de barra (*bus*) y lado equipo de cada interruptor.
34. El responsable de cada subestación eléctrica realizará la acción física e informará la apertura de cada cuchilla.
35. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica bloquear eléctrica y mecánicamente el accionamiento de las cuchillas de cada subestación.

19

36. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará sobre el bloqueo realizado.
37. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica verificar la ausencia de diferencia de tensión en cada fase y entre fases del equipo eléctrico.
38. El responsable de cada subestación eléctrica verificará e informará la ausencia de diferencia de tensión en cada fase y entre fases del elemento eléctrico que se esté librando.
39. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el cierre de las cuchillas de puesta a tierra.
40. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará el cierre de las cuchillas de puesta a tierra.
41. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el bloqueo de las cuchillas de puesta a tierra.
42. El responsable de cada subestación eléctrica informará sobre el bloqueo realizado.
43. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica colocar tarjetas auxiliares rojas en elementos de accionamiento asociados a cada interruptor y cuchillas.
44. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará sobre la colocación de tarjetas auxiliares rojas en elementos de accionamiento asociados a cada interruptor y cuchillas.
45. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el retiro de los fusibles o apertura de los interruptores termomagnéticos de los Transformadores de Potencial (TP's).
46. El responsable de cada subestación eléctrica retirará los fusibles o abrirá los interruptores termomagnéticos de los Transformadores de Potencial (TP's) e informará.
47. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el cortocircuitar los bornes del secundario de los Transformadores de Corriente (TC's), si fuere necesario.
48. El responsable de cada subestación eléctrica cortocircuitará los bornes del secundario de los Transformadores de Corriente (TC's) e informará.
49. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada punto a laborar, la colocación del equipo personal de puesta a tierra provisional en ambos extremos del punto de trabajo.
50. El responsable de cada punto a laborar colocará su equipo personal de puesta a tierra provisional e informará para comenzar su mantenimiento.
51. El operador del centro de control del Transportista informará los horarios de cada paso de la maniobra al operador del CENACE.
52. El operador del CENACE autorizará el inicio del mantenimiento predictivo, preventivo o ambos del elemento librado.

b. Maniobras de Normalización para Reconectar el Elemento Eléctrico.

En este apartado, se realizan las maniobras de normalización para reconectar el equipo eléctrico que se libró.

1. El responsable de cada subestación eléctrica y su personal, verificarán que los trabajos de cada especialidad hayan concluido.
2. El responsable de cada subestación eléctrica informará al operador del centro de control del Transportista que los trabajos de mantenimiento han concluido al cien por ciento, dando información relevante.
3. El responsable de cada subestación eléctrica informará al operador del centro de control del Transportista que el elemento eléctrico está disponible para realizar maniobras y reconectarlo a la red eléctrica.
4. El operador del centro de control del Transportista solicitará al personal que trabajó en cada punto de trabajo, el retiro de los equipos personales de puesta a tierra provisionales y cualquier objeto extraño.
5. El responsable de cada subestación eléctrica informará del retiro del equipo personal de puesta a tierra en los puntos de trabajo y libre de objetos extraños.

17

6. El operador del centro de control del Transportista solicitará al operador del CENACE la autorización para iniciar con las maniobras de normalización.
7. El operador del CENACE verificará las condiciones operativas y autorizará el comienzo de las maniobras para reconectar el elemento eléctrico.
8. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica que verifique la apertura del interruptor junto con sus cuchillas (lado *bus* y equipo) asociadas, que las cuchillas de puesta a tierra se encuentren cerradas, que no existan alarmas operadas y que no haya alguna anomalía asociada al elemento eléctrico.
9. El responsable de cada subestación eléctrica verificará e informará la apertura del interruptor junto con sus cuchillas (lado *bus* y equipo) asociadas, que las cuchillas de puesta a tierra se encuentren cerradas, que no existen alarmas operadas y que no existe alguna anomalía asociada al elemento eléctrico.
10. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el retiro de las tarjetas auxiliares rojas en elementos de accionamiento asociados a cada interruptor y cuchillas.
11. El responsable de cada subestación eléctrica informará al centro de control del Transportista que se encuentran retiradas las tarjetas auxiliares rojas en elementos de accionamiento asociados a cada interruptor y cuchillas.
12. El operador del centro de control del Transportista desinhibirá y retirará las tarjetas auxiliares rojas en los telemandos asociados al interruptor y demás controles asociados al elemento eléctrico de cada subestación.
13. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica volver a instalar los fusibles de los Transformadores de Potencial (TP's) del equipo eléctrico que está librado.
14. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará al operador del centro de control del Transportista que se encuentran instalados los fusibles de los Transformadores de Potencial (TP's) del equipo eléctrico que está librado.
15. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica retirar el cortocircuitado del secundario de los Transformadores de Corriente (TC's) del equipo eléctrico que está librado.
16. El responsable de cada subestación eléctrica retirará e informará al operador del centro de control del Transportista que ya no se encuentra cortocircuitado el secundario de los Transformadores de Corriente (TC's) del equipo eléctrico que está librado.
17. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el retiro de bloqueos, abrir las cuchillas de puesta a tierra y dejarlas bloqueadas nuevamente.
18. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará al operador del centro de control del Transportista que se encuentran abiertas y bloqueadas las cuchillas de puesta a tierra.
19. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica el retiro de bloqueos para cerrar las cuchillas de bus y lado equipo, posteriormente volverlas a bloquear.
20. El responsable de cada subestación eléctrica realizará e informará al centro de control del Transportista que se encuentran cerradas y bloqueadas las cuchillas de bus y lado equipo.
21. El operador del centro de control del Transportista informará al responsable de cada subestación eléctrica que enviará el telemando de cierre a cada interruptor, de manera alternada.
22. El responsable de cada subestación eléctrica verificará físicamente e informará al centro de control del Transportista que se encuentran cerrados los interruptores, de manera alternada.
23. El operador del centro de control del Transportista solicitará al responsable de cada subestación eléctrica verificar las corrientes y voltajes en cada fase.
24. El responsable de cada subestación eléctrica verificará e informará al centro de control del Transportista las corrientes y voltajes por fase del interruptor.

El operador del centro de control del Transportista desbloqueará los siguientes controles:

25. Los Esquemas de Acción Remedial, de ser necesario.
26. Los Esquemas de Protección de Sistema, de ser necesario.
27. Las Transferencias Automáticas, de ser necesario.
28. El operador del centro de control del Transportista informará los horarios de cada paso de la maniobra al operador del CENACE y dará por concluida las maniobras.
29. El operador del CENACE retirará la licencia otorgada al operador del centro de control del Transportista.
30. El operador del centro de control del Transportista informará al responsable de cada subestación eléctrica el retiro de las licencias involucradas en el mantenimiento y dará por concluida las maniobras de normalización.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de libranza de un elemento eléctrico es un proceso sumamente importante y delicado.

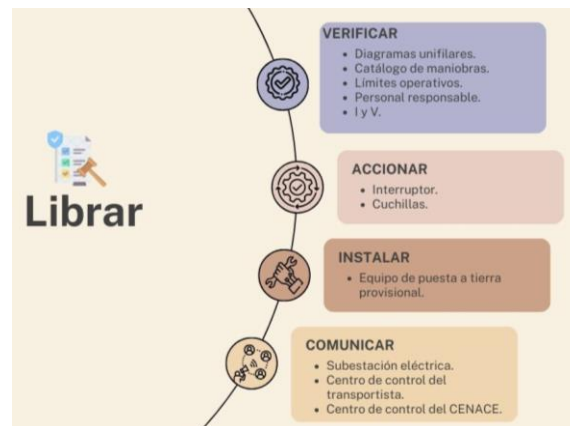


Fig. 2. Puntos para librar un elemento eléctrico.

La figura 2, presenta los puntos importantes para librar un elemento eléctrico, el cual, es el proceso de verificar para garantizar que se tenga la misma información en los centros de control y en la subestación eléctrica. Ello permite determinar los parámetros que pueden ser validados sobre los límites de cada equipo en la red eléctrica, lo anterior, considerando el criterio de n-1.

Asimismo, la constante monitorización de las corrientes y voltajes de fase, permite asegurar que el elemento eléctrico no esté energizado bajo una condición de libranza. Por ende, el personal responsable debe estar atento de dichas medidas para tener certeza que el equipo eléctrico esté desenergizado.

Por otro lado, al accionar un interruptor o cuchillas, es conveniente hacer una inspección física de la acción tomada. Ya sea, para la apertura o cierre de estos dispositivos. Lo anterior, para que posteriormente sean instalados los equipos de puesta a tierra provisional en ambos extremos del punto de trabajo

Finalmente, la comunicación constante entre centros de control y en las subestaciones permite tener conocimiento de cada paso de las maniobras, por lo que es relevante para salvaguardar la integridad del personal de campo, de la instalación eléctrica y del SEP.

VI. CONCLUSIONES

De acuerdo a lo obtenido en la presente investigación, se puede afirmar que, los factores importantes que impiden que se cometa un accidente durante la ejecución de las maniobras son:

1. Verificar las condiciones de la instalación eléctrica.
2. Corroborar la nomenclatura del equipo eléctrico a librar.
3. Verificar físicamente la apertura de interruptores y cuchillas.
4. Validar la ausencia de corrientes y voltajes por fase.
5. Colocar las tarjetas auxiliares rojas.
6. Colocar equipo personal de puesta a tierra personal en ambos extremos del punto a laborar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala por el apoyo brindado. Asimismo, un reconocimiento especial a los compañeros de campo quienes contribuyeron en mejorar el presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] Y. Chindicué Arias, B. D. Burbano Baena, "Análisis de las cuasas de los accidentes de trabajo por peligros eléctricos en empresas del Departamento de Cuaca asociadas a riesgo eléctrico durante el periodo 2016-2020," Tesis de Licenciatura, Facultad de Educación a Distancia y Virtual, Universidad Antonio José Camacho, Santiago de Cali, Colombia, 2021. [En línea]. Recuperado de: <https://repositorio.uniajc.edu.co/handle/uniajc/397>
- [2] B. U. Bravo Herrera, J. A. Garay Mantilla, "Plan de prevención de riesgos y accidentes laborales para una empresa pública," Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2023. [En línea]. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25082>
- [3] Comisión Nacional de Vivienda, 2021. "Si pones muchas luces en Navidad o tienes conectados numerosos aparatos aguas con tu instalación eléctrica" [En línea]. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conavi/prensa/si-pones-muchas-luces-en-navidad-o-tienes-conectados-numerosos-aparatos-aguas-con-tu-instalacion-electrica-denuncia?idiom=es#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20se%20registran%2C%20aproximadamente,seguras%20para%20evitar%20accidentes%20el%C3%A9ctricos>
- [4] Diario Oficial de la Federación. (2021, 31 diciembre) "RESOLUCIÓN Núm. RES/550/2021 de la Comisión Reguladora de Energía por la que se expiden las Disposiciones Administrativas de Carácter General que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red," 31 diciembre 2021. [En línea]. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5639920&fecha=31/12/2021#gsc.tab=0
- [5] CFE, *Capítulo 800: Reglamento de Seguridad e Higiene: CFE Transmisión*, Comisión Federal de Electricidad, México, 2011.
- [6] CFE, *Capítulo 100: Reglamento de Seguridad e Higiene en el Trabajo: CFE Distribución*, Comisión Federal de Electricidad, México, 2018.
- [7] N. R. Hercilla Huapaya, "Diseño asistido por software en un sistema puesta a tierra para una subestación en Pachacamac de 10000 KVA," Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingeniería y Gestión, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, 2020. [En línea]. Recuperado de: <https://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/605>
- [8] J. L. Mar Villegas, *Mercados de Electricidad y Servicios de Transmisión* (Invierno, 2023), Puebla. México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [9] Diario Oficial de la Federación. (2017, 13 noviembre) "ACUERDO por el que se emite el Manual de Programación de Salidas". [En línea]. Recuperado de: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5504325&fecha=13/11/2017#gsc.tab=0
- [10] CFE, *Procedimiento de Supervisiones Efectivas*. Comisión Federal de Electricidad, México, 2023.

- [11] Centro Nacional de Control de Energía, *Sistema de Información de Mercado: Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y de la RGD*, 2023. [En línea]. Recuperado de:
https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/ProgramaRNT_RDG.aspx
- [12] Comisión Federal de Electricidad. (2016, 30 septiembre). Zona de Transmisión Puebla. [En línea]. Recuperado de:
<https://potransmision.cfe.mx/XXVIII%20Procedimientos%20de%20adjudicacin%20directa%20invit/Licitaci%C3%B3n%20P%C3%BAblica%20%20Invitaci%C3%B3n%20Restringida/Convocatoria%20o%20invitaciones%20emitidas/Z.T%20PUEBLA/2016%20CONVOCATORIA%20IA-018TOQ874-E62-2016%20700475501.pdf?Mobile=1&Source=%2F%5Flayouts%2F15%2Fmobile%2Fviewa%2Easpx%3FList%3D0276c2b5%2D32c8%2D4509%2D917c%2Db212f3768b7d%26View%3D151d4228%2Dc4e5%2D4ee9%2Da4d0%2D70135563b801%26RootFolder%3D%252FXXVIII%2BProcedimientos%2Bde%2Badjudicaci%C3%B3n%2Bdirecta%2Binvit%252FLicitaci%C3%B3n%2BP%25u00fablica%2B%2BInvitaci%C3%B3n%2BRestringida%252FConvocatoria%2Bo%2Binvitaciones%2Bemitidas%252FZ%2ET%2BPUEBLA%26wdFCCState%3D1>
- [13] J. L. Mar Villegas, “Toma de Decisiones de la Gerencia de Control Regional Oriental del CENACE: Un Análisis del Precio Marginal Local de los Nodos de Energía,” Tesis de Doctorado, Escuela de Negocios, Instituto de Estudios Universitarios, Puebla, México, 2022.
- [14] J. L. Mar-Villegas, “Seguridad e higiene en la operación de Sistemas Eléctricos de Potencia”, 2024 [Webinar]. IEEE sección Puebla, México. Recuperado de: <https://events.vtools.ieee.org/m/419920>
- [15] NFPA, *Handbook for Electrical Safety in the Workplace* 2024. National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, Massachusetts USA, 2023.
- [16] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, Estado de México, México, McGraw-Hill/Interamericana de México, 2007.

Desarrollo de un sistema de traducción de textos impresos al braille mediante la metodología de diseño mecatrónico

Development of a Printed Text to Braille Translation System using the Mechatronic Design Methodology

Umanel **Hernandez Gonzalez**¹, Flabio **Mirelez Delgado**², José **Díaz Pérez**³,
Jesús **Letchipia Padilla**⁴, Roberto Cruz **Leija**⁵

Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO

¹ORCID: 0000-0002-4109-1776 | uahernandez@ipn.mx

²ORCID: 0000-0003-3547-9739 | fmirelezd@ipn.mx

³ORCID: 0009-0004-7139-7305 | jdiazp1501@alumno.ipn.mx

⁴ORCID: 0009-0000-8939-3784 | jletechipiap1500@alumno.ipn.mx

⁵ORCID: 0000-0003-1746-0487 | rocruzl@ipn.mx

Recibido 07/11/2024, aceptado 24/01/2025.

Resumen

El documento aborda el desarrollo de un sistema de traducción de textos impresos a lenguaje Braille mediante la metodología de diseño mecatrónico, con el objetivo de mejorar el acceso al conocimiento para personas con discapacidad visual. Se destaca la utilización de tecnologías de visión artificial y mecanismos para recrear letras en Braille que faciliten el aprendizaje en este lenguaje en edades tempranas. La estación propuesta permite al usuario leer cualquier texto impreso de manera convencional y brinda información útil para cuidadores, tutores o personal a cargo de la del usuario del prototipo. Se mencionan recomendaciones para el uso del sistema, como evitar papeles reflectores de luz y utilizar letras legibles. Se resalta el éxito del proyecto puesto que el sistema es capaz de reconocer texto escrito a mano alzada, brindando soluciones efectivas y accesibles para la comunidad de personas con discapacidad visual. Además, se presentan posibles actualizaciones y correcciones para mejorar la experiencia del usuario.

Palabras clave: inclusión, braille, visión artificial, sistemas mecatrónicos, tecnologías de la comunicación.

Abstract

The paper addresses the development of a system for the translation of printed texts into Braille language using the mechatronic design methodology, with the aim of improving access to knowledge for people with visual impairment. It highlights the use of artificial vision technologies and mechanisms to recreate Braille letters to facilitate learning in this language at an early age. The proposed station allows the user to read any printed text in a conventional way and provides useful information for caregivers, tutors or personnel in charge of the user of the prototype. Recommendations for the use of the system are mentioned, such as avoiding light-reflecting papers and using legible letters. The success of the project is highlighted since the system can recognize handwritten text, providing effective and accessible solutions for the visually impaired community. In addition, updates and corrections to improve the user experience are presented.

Index terms: inclusion, braille, machine vision, mechatronic systems, communication technologies.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se exponen los motivos esenciales que respaldan la implementación de este prototipo, así como los desafíos que enfrentan las personas al llevar a cabo su formación académica y los costos asociados. Según la Sociedad Mexicana de Oftalmología y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México hay aproximadamente 2 millones 237 mil personas con deficiencia visual y más de 415 mil 800 personas con ceguera, lo que representa un 2.1% de la población total. Estas personas enfrentan dificultades para recibir una educación adecuada debido a la falta de personal capacitado, escasez de material y pérdida de interés. Esto dificulta el aprendizaje del sistema Braille durante la educación básica y su continuación hasta obtener una cedula profesional [1].

En el estado de Zacatecas, solamente la capital zacatecana cuenta con un aproximado de 600 jóvenes que presentan debilidad visual o ceguera y no pueden integrarse a un ambiente escolar. Debido a las nuevas políticas de inclusión, el gobierno estatal ha tomado la decisión que las personas que presentan este tipo de discapacidad deben de integrarse al ambiente escolar como el de los demás estudiantes [8]. Por otro lado, el tiempo de aprendizaje para lograr leer el sistema Braille tiene una duración promedio de 4 meses para la versión no contraída [2].

La impresión del código Braille en papel con relieve mediante impresoras especiales dificulta su producción. Los libros en Braille tienen desventajas en términos de tamaño y costo, ya que el relieve de las letras ocupa más espacio que la escritura en tinta y el papel utilizado es más caro y escaso [3]. Esto limita la accesibilidad y aumenta los costos de aprendizaje, lo que deja excluida a una parte importante de la población. Además, el aumento de la discapacidad visual a nivel mundial, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), plantea un problema que no puede ser ignorado [4].

La exdirectora del Instituto para la Atención e Inclusión de las Personas con Discapacidad en el Estado de Zacatecas, comentó que en el estado se cuenta con dos impresoras que permiten la lectura de archivos especiales que permiten el empastado de Braille, las cuales cada una de ellas tiene un costo superior a los \$150,000.00 MXN, además estos archivos son emitidos por un software que su licencia tiene un costo promedio \$15,000.00 MXN.

A partir de estos problemas, se desarrolló un prototipo que permita convertir rápidamente cualquier texto en Braille sin la necesidad de una computadora personal. Esto mejorara el acceso al conocimiento para las personas con discapacidades visuales y reduciría los costos de aprendizaje y autonomía. Además, se abrirían nuevas oportunidades de investigación y trabajo para estas personas. Aunque existen sistemas similares en el mercado, la ventaja de este prototipo es que no se limita a la lectura de documentos digitales, sino que abarca a todos los estudiantes con problemas de visión, desde la educación básica hasta la universidad. El diseño del prototipo utilizara tecnologías de visión artificial y mecanismos para recrear letras en Braille, creando un relieve texturizado que facilite el aprendizaje de diversos temas en el lenguaje Braille.

II. TRABAJO RELACIONADO

En la actualidad, el avance tecnológico ha permitido la creación de diversas herramientas tecnológicas que ayudan al aprendizaje de lectura, como de redacción en lenguaje Braille a las personas que lo necesitan. A continuación, se presentan algunas herramientas diseñadas actualmente con el objetivo de facilitar el aprendizaje de Braille, las cuales presentan las siguientes características [5].

Braibook es un dispositivo que permite la lectura de diversos documentos digitales de cualquier formato, sin importar el idioma, al Braille, además permite salida de audio, tiene un solo carácter con la finalidad de que el usuario, con solo pasar la mano por encima de él, pueda realizar la lectura. Cuenta con una batería que permite su uso por 5 horas, con una capacidad de 8 GB, además cuenta con entrada USB y bluetooth para la recepción de libros. Con un costo de \$17 500.00 MXN [6].

Jogar es un juguete diseñado por Marisol Amador Salas, egresada de diseño industrial de la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA). Jugar es un tablero electrónico, que con ayuda de piezas denominadas hongos, el niño puede formar una letra, sílaba o palabra, y al finalizar presiona un botón, verificando que esté bien escrita, si es así se escuchará fonéticamente, sino es así permanecerá en silencio. También ayuda a desarrollar el tacto con ayuda de fichas y regletas para formar palabras, mientras amplía su vocabulario [7].

Braille Sense U2 es un dispositivo electrónico cuya función es permitir que las personas con discapacidad visual puedan acceder a una variedad de aplicaciones y herramientas que les facilitan su vida diaria, como procesamiento de textos, lectura de libros electrónicos, navegación por internet, correo electrónico, entre otras. Además, el dispositivo también cuenta con aplicaciones como calculadora científica, visor de correo

electrónico, Excel, PowerPoint, y redes sociales como Facebook y Twitter. Su precio en el mercado se sitúa en torno a los \$95,000.00 MXN, según la conversión de dólares [8].

El proyecto que se desarrolló se caracteriza ya que permite la lectura de diferentes textos, incluyendo letra a mano alzada, lo que permite a los pacientes leer cualquier texto.

III. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se decidió usar la metodología de diseño mecatrónico ya que además de obtener buenos resultados en proyectos de robótica como en [9], [10], [11] y [12]. El objetivo principal del proyecto consiste en diseñar y construir un prototipo de una máquina didáctica que mediante el uso de visión artificial permita la interpretación y traducción de un texto impreso a Braille. Para lograr lo anterior se debe programar la traducción del abecedario a lenguaje Braille y desarrollar una máquina receptora en la que se pueda palpar la traducción. Así mismo, se debe integrar una interfaz para una persona que asista al usuario y que permita observar el número de palabras leídas, el tiempo que tardó en leerlas y cambiar la velocidad de lectura de caracteres mediante botones. Otro punto importante es que mediante el uso de actuadores se puede construir el relieve en el dispositivo receptor y mediante visión artificial se puede detectar y capturar los caracteres impresos en una hoja de papel bond tamaño carta, con ayuda de la implementación de un OCR (*Optical Character Recognition* por sus siglas en inglés y en español Reconocimiento Óptico de Caracteres).

IV. DESARROLLO

A. Identificación de necesidades

Las personas que presentan algún tipo de discapacidad visual al ser un porcentaje mínimo en la población mexicana, desde temprana edad presentan problemas para empezar su educación, ya que no se cuenta con el suficiente personal capacitado para esta minoría en el sistema educativo. Pero en la actualidad se cuenta con la tecnología suficiente, que permite la creación de dispositivos que faciliten la educación de este sector de la población, para la comprensión de la lectura y escritura en sistema Braille [11].

B. Análisis del problema

Para dar respuesta a la necesidad que se propuso, se tiene que plantear el desarrollo del prototipo de estación de lectura de Braille donde su creación se puede dividir en 4 subproblemas:

1. El diseño y construcción de la estructura del prototipo, para que este sea capaz de soportar el peso de los documentos a escanear al igual que iluminarlos correctamente.
2. El desarrollo del sistema de visión artificial enfocado al reconocimiento óptico de caracteres.
3. El diseño e implementación de mecanismos sujetos a actuadores para hacer posible la interpretación al lenguaje Braille.
4. La creación de la interfaz a mostrar en el display para indicar información relacionada a la lectura del usuario y su avance de aprendizaje.

Como parte del proceso de diseño mecatrónico y para dar una mejor idea del funcionamiento deseado del sistema en la siguiente sección se muestra la metodología IDEF-0 en la cual se desarrollan los distintos niveles de los sistemas que conforman el proyecto.

En la Figura 1 se muestra el diagrama A-0, en donde se describe de manera general el proceso de traducción del sistema, con sus respectivas entradas, controles, mecanismos y salidas. La Figura 2 muestra el diagrama A0, el cual se muestran los procesos para el funcionamiento del sistema de traducción Braille, donde los controles que rigen los procesos son la configuración de velocidad, tiempo de respuesta, tamaño de fuentes e iluminación; los mecanismos son los actuadores, instrumentación y el microcontrolador, la entrada es el texto impreso para obtener como salida el texto traducido a Braille, los tres subprocesos son: el reconocimiento óptico de caracteres, el procesamiento de datos, la activación de mecanismos de impresión y la muestra de datos y estadística de avance.

4

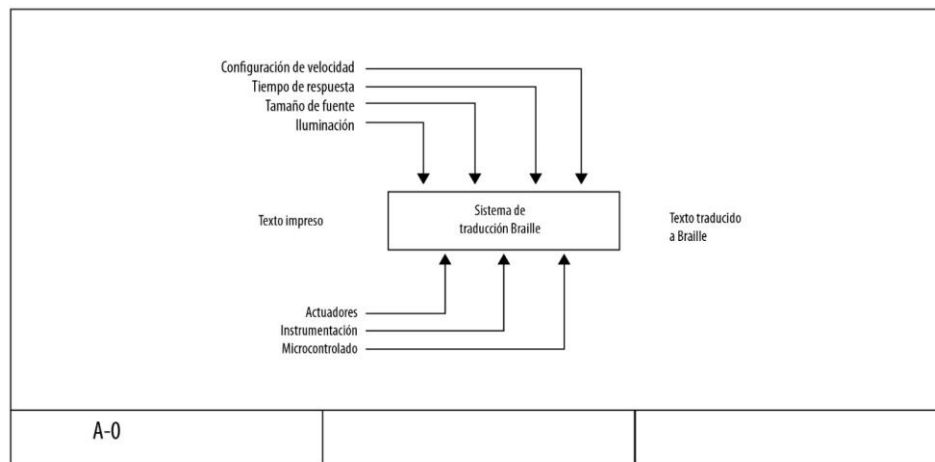


Fig. 1. Diagrama IDEF nivel A-0.

Para poder definir las especificaciones de diseño se deben enlistar las necesidades que debe llevar el proyecto ponderando del 1 al 5, donde 5 es lo más importante y 1 es lo menos importante. Cabe destacar que estas ponderaciones se hicieron de acuerdo con las necesidades que los desarrolladores del proyecto detectaron, esto se muestra en la Tabla 1.

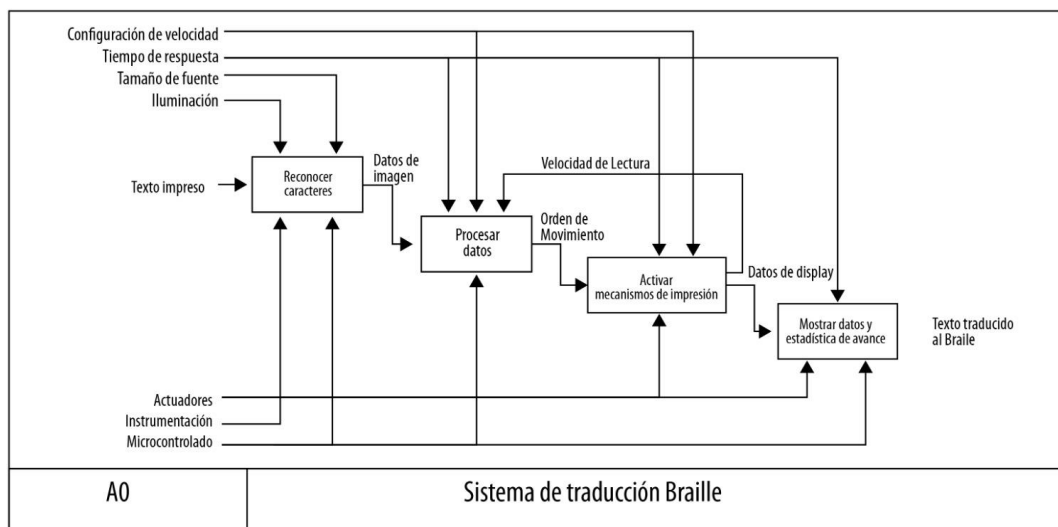


Fig. 2. Diagrama IDEF nivel A0.

TABLA I. LISTA DE NECESIDADES.

No.	Necesidad	Importancia
1	Preciso al reconocer caracteres	5
2	Fácil de usar	4
3	Buena estética	2
4	Tener control de velocidad	4
5	Contar el número de letras leídas por minuto	4
6	Permitir la sujeción de una hoja tamaño carta	4
7	Resistente a caídas	3
8	Tiene una interfaz de usuario amigable	3
9	La estructura debe contar con elementos de seguridad	2
10	Bajo costo	3
11	Fácil de trasladar	3
12	Compacto	2

Una vez se tienen las necesidades ponderadas, se tienen que asociar al proyecto en forma de métricas y de esta manera se puedan expresar las especificaciones de diseño. En la Tabla 2 se muestran las métricas que se lograron definir al igual que su relación con las necesidades y su importancia.

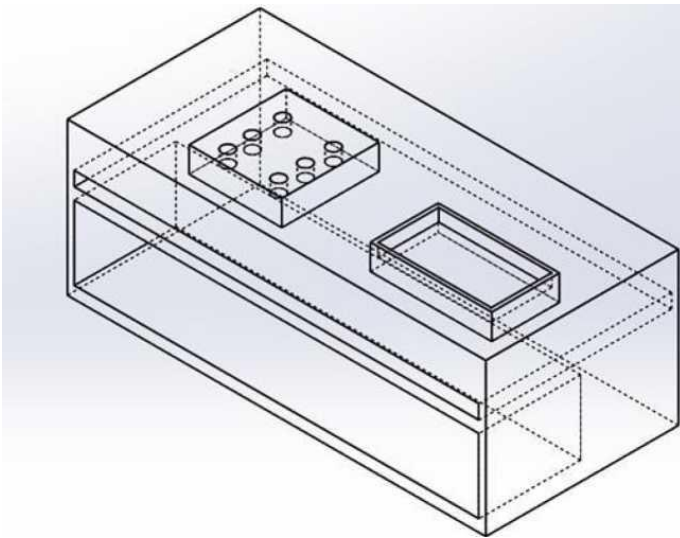
C. Propuestas de posibles soluciones

Con base en algunas ideas generadas por pensamiento divergente, se realizaron 3 diseños conceptuales para ser analizados y elegir el que mejor se adecue a los criterios necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo.

- a) **Diseño conceptual 1.** Se caracteriza por tener una gran durabilidad y una carcasa tipo rectangular. El material principal es madera y tiene un compartimiento específico para agrupar los componentes, cosa que facilita su mantenimiento. Así mismo emplea el mecanismo de levas como principal recurso de funcionamiento (véase Figura 3).

TABLA 2. LISTA DE MÉTRICAS.

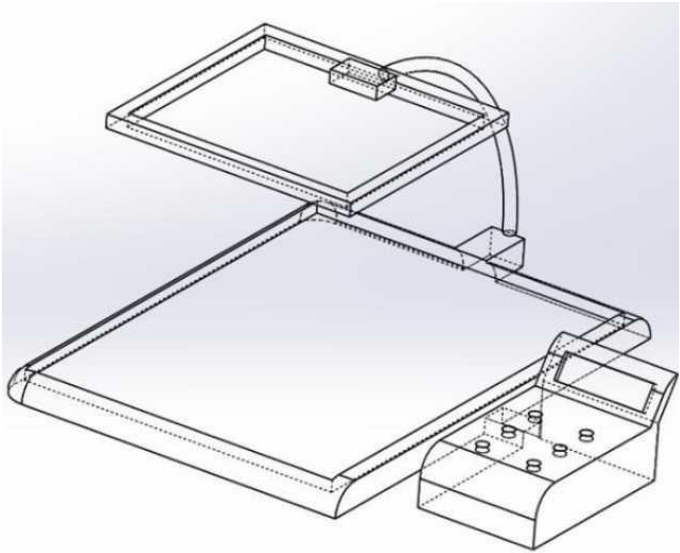
No. de Métrica	No. de Necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1	Control de iluminación	5	Lúmenes
2	4, 5	Conteo de letras	5	-
3	1	Precisión	5	-
4	3	Estética	2	-
5	1	Calidad de la cámara	3	Píxeles
6	8, 2	Facilidad de uso	4	-
7	9, 11	Estabilidad de la estructura	3	-
8	11	Peso	2	Kilogramo
9	11, 12	Volumen de estructura	2	Metro Cúbico
10	10	Costo del prototipo	3	Peso Mexicano
11	9	Seguridad del usuario	3	-
12	7	Esfuerzo	3	Newtons
13	8	Interfaz amistosa	3	-



Características	DC1
Estilo de Atril	Geométrico
Material de la estructura	Madera
Sistema de iluminación	Bombilla incandescente
Actuadores	Micro-reductor
Mecanismos	Mecanismo de levas
Alimentación	Conector DC

Fig. 3. Boceto del diseño conceptual 1.

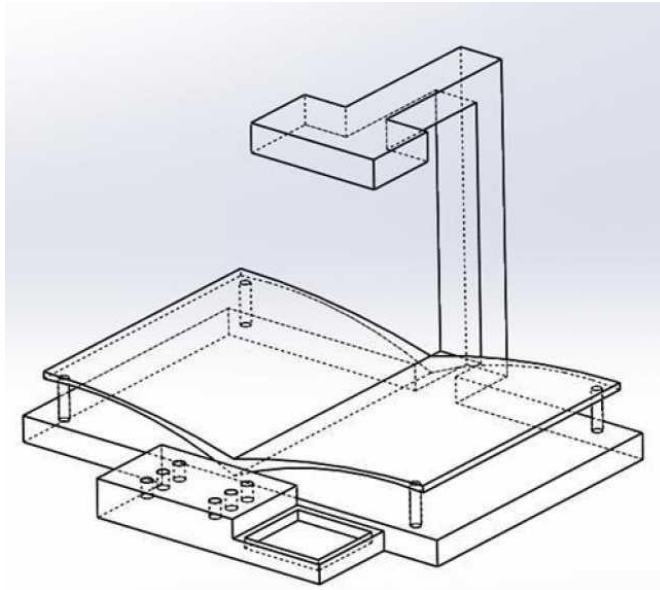
b) **Diseño conceptual 2.** En la Figura 4 se muestra la propuesta de un diseño conceptual. Este presenta una carcasa hecha a partir de acrílico. La principal característica de esta es su forma orgánica que evita accidentes gracias a sus esquinas redondeadas. Utiliza un mecanismo biela-manivela y un sistema de iluminado construido a partir de tiras de LED SMD. Añadiendo una mayor portabilidad gracias a su sistema de alimentación de baterías.



Características	DC1
Estilo de Atril	Orgánica
Material de la estructura	Acrílico
Sistema de iluminación	LED SMD
Actuadores	Picoservomotor
Mecanismos	Mecanismo de biela manivela
Alimentación	Batería LiPo

Fig. 4. Boceto del diseño conceptual 2.

- c) **Diseño conceptual 3.** Este diseño (véase Figura 5) presenta una construcción a base de plástico con estilo moderno. Su principal característica es el uso de un atril para libros junto con el empleo de un Led tipo COB para la iluminación. El mecanismo usado por este diseño es del tipo piñón cremallera.



Características	DC1
Estilo de Atril	Moderno
Material de la estructura	Plástico
Sistema de iluminación	LED COB
Actuadores	Microservomotor
Mecanismos	Piñón-cremallera
Alimentación	Batería ácido-plomo

Fig. 5. Boceto del diseño conceptual 3.

Después de generar las diferentes soluciones, se definen criterios de selección para evaluar los diferentes diseños conceptuales y elegir la solución que se ajuste mejor a las necesidades del problema planteado. A partir de la Tabla 3 se evaluó cada diseño conceptual asignando una ponderación para cada criterio de 80% = excelente, 60% = bueno y 40% = malo.

TABLA 3. TABLA DE PERTENENCIA.

Criterios de selección	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	Total	Pertenencia
A. Debe de iluminar toda la hoja a escanear	X	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	0.182
B. Tamaño	0	X	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0.018
C. Costo de componentes	0	1	X	1	0	0	1	1	0	0	0	4	0.073
D. Fácil de transportar	0	1	0	X	0	0	1	1	0	0	1	4	0.073
E. Durabilidad	0	1	1	1	X	1	1	1	1	1	1	9	0.164
F. Facilidad de uso	0	0	1	1	0	X	1	1	1	1	0	6	0.109
G. Facilidad de mantenimiento	0	1	0	0	0	0	X	1	1	0	1	4	0.073
H. Ensamble sencillo	0	1	0	0	0	0	0	X	1	1	0	3	0.055
I. Seguridad	0	1	1	1	0	0	0	0	X	1	1	5	0.091
J. Autonomía	0	1	1	1	0	0	1	0	0	X	1	5	0.091
K. Proceso de manufactura	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	X	4	0.073
												55	1

De acuerdo con los resultados de la Tabla 4 se toma el diseño conceptual 2 como diseño final debido a que destaca tanto en seguridad, tamaño y facilidad de transporte, sin dejar de tener un buen rendimiento en los demás criterios de selección por lo que se acerca más a los criterios necesarios para un correcto funcionamiento.

TABLA 4. TABLA DE SELECCIÓN.

Criterios de selección	DC1	DC2	DC3	Pertenencia
A. Debe de iluminar toda la hoja a escanear	0.8000 0.1456	0.8000 0.1456	0.8000 0.1456	0.1820
B. Tamaño	0.4000 0.0072	0.8000 0.0144	0.8000 0.0144	0.0180
C. Costo de componentes	0.8000 0.0584	0.4000 0.0292	0.4000 0.0292	0.0730
D. Fácil de transportar	0.4000 0.0292	0.8000 0.0584	0.6000 0.0438	0.0730
E. Durabilidad	0.8000 0.1312	0.6000 0.0984	0.6000 0.0984	0.1640
F. Facilidad de uso	0.6000 0.0654	0.6000 0.0654	0.6000 0.0654	0.1090
G. Facilidad de mantenimiento	0.8000 0.0584	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.0730
H. Ensamble sencillo	0.6000 0.0330	0.6000 0.0330	0.6000 0.0330	0.0550
I. Seguridad	0.4000 0.0364	0.8000 0.0728	0.6000 0.0546	0.0910
J. Autonomía	0.4000 0.0364	0.6000 0.0546	0.8000 0.0728	0.0910
K. Proceso de manufactura	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.6000 0.0438	0.0730
Total	0.6450	0.6594	0.6448	1.0000

D. Diseño detallado

A continuación, se aborda lo referente al diseño detallado del prototipo de la estación para lectura y enseñanza de Braille que permita la traducción de textos impresos, teniendo en cuenta tanto la parte mecánica y estructural, así como la parte electrónica.

- Diseño mecánico. En el proceso de generar el movimiento de los eslabones finales para la producción del relieve simbólico en Braille a partir del engrane y la cremallera, se incluyen barras de unión como se puede observar en la Figura 6. Por otro lado, en la Figura 7 se muestra la estructura final propuesta para la estación de traducción.

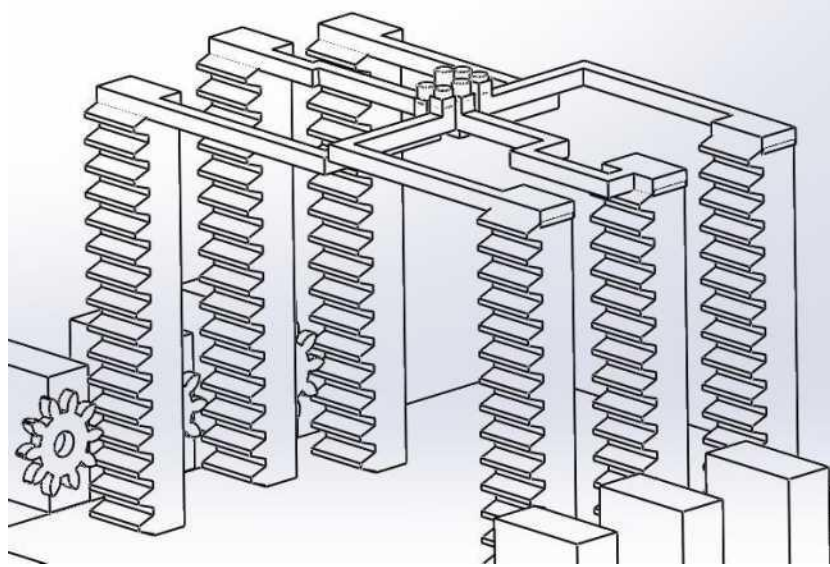


Fig. 6. Mecanismo piñón-cremallera.

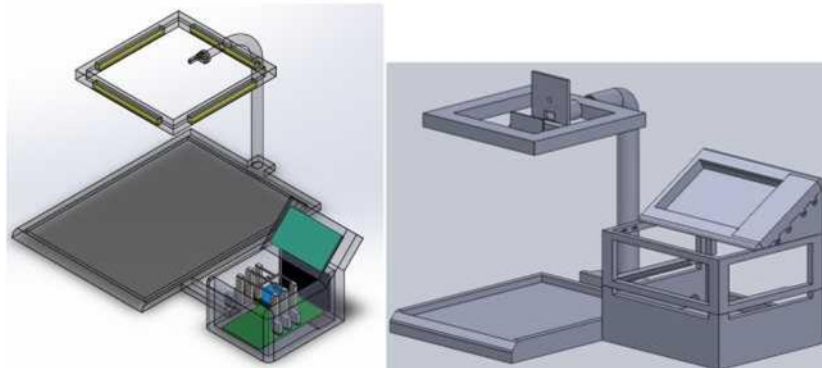


Fig. 7. Estructura final.

E. Diseño electrónico

En la Figura 8 se puede observar el diagrama de conexiones teniendo en cuenta que se realizó en un software de diseño electrónico, este circuito debe tener la conexión con la etapa de acondicionamiento de señales, las resistencias, los actuadores y el microcontrolador.

F. Diseño gráfico de la interfaz

En la Figura 9, se muestra el diseño gráfico de la interfaz el cual cuenta con un diseño sencillo e intuitivo, para que la persona responsable pueda comprender de manera sencilla su funcionamiento, donde se muestra un menú con los diversos apartados que se consideran además de un apartado para apagar el prototipo.

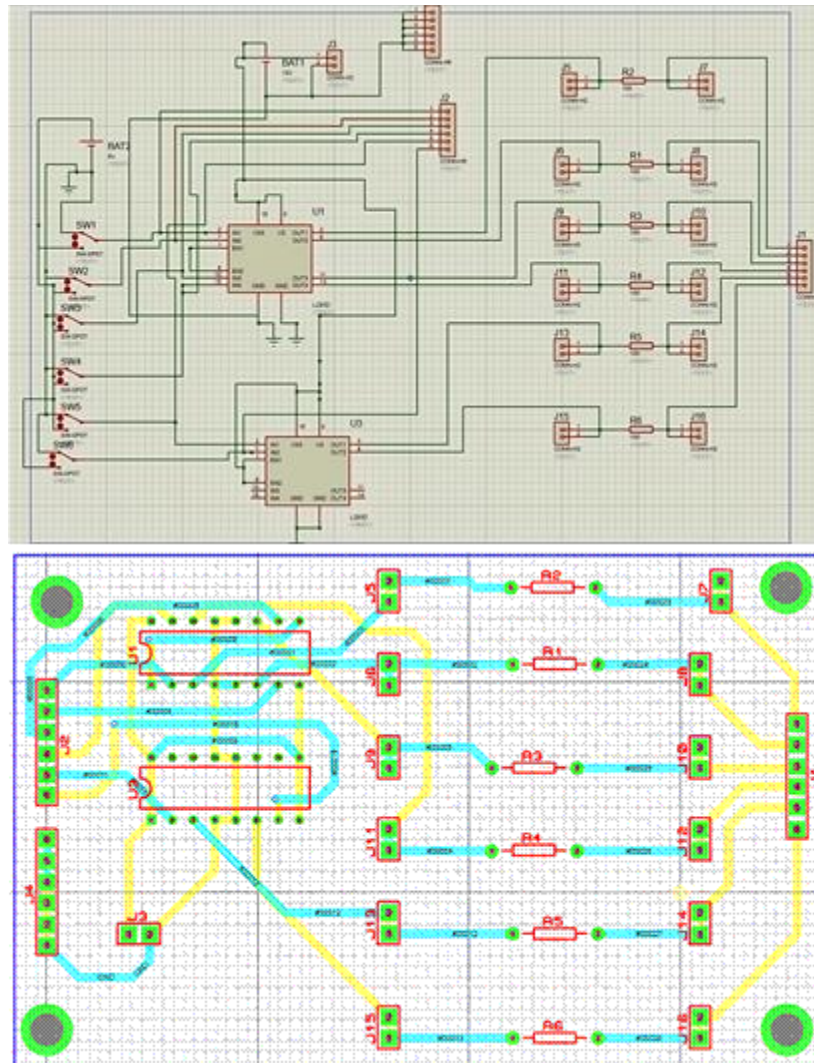


Fig. 8. PCB Rediseño (Parte superior diseño electrónico y parte inferior Placa PBC).

La Figura 10 muestra el diseño gráfico de la ventana de verificación de posición donde se contará con una vista previa de la posición de la hoja que se desea traducir, una vez que sea colocada de manera correcta se observará la velocidad que cuenta el prototipo y el número de caracteres, además de contar con dos botones de iniciar con la traducción y otro para parar la misma en el momento que el encargado crea conveniente.

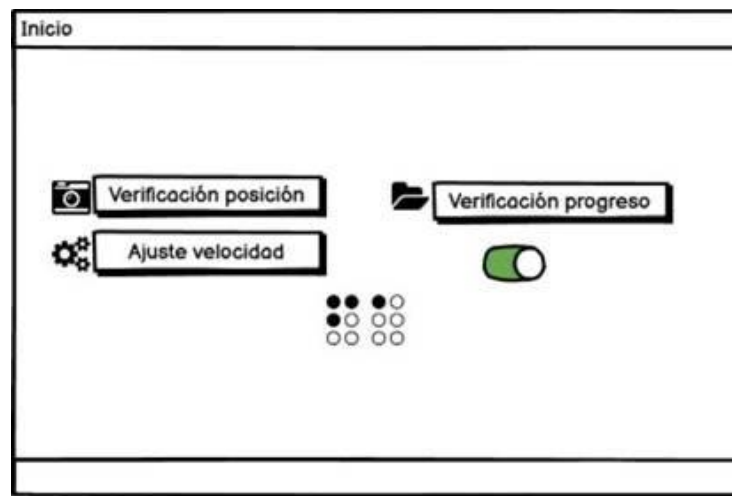


Fig. 9. Diseño gráfico de interfaz ventana inicio.

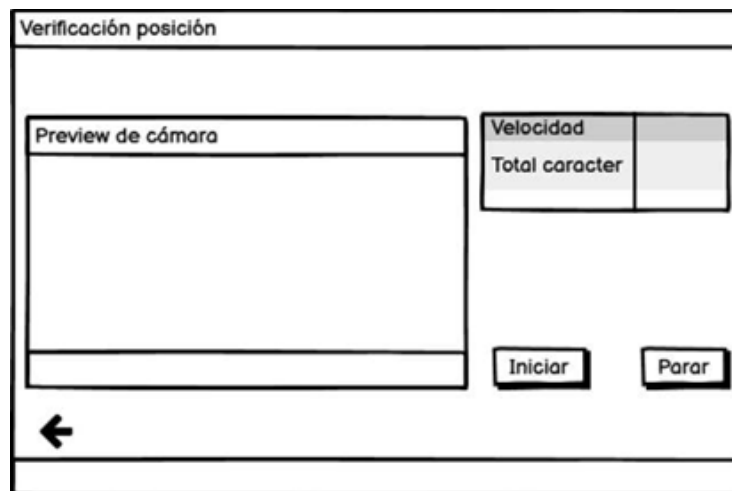


Fig. 10. Diseño gráfico de interfaz verificación posición.

V. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

El prototipo final se muestra en la Figura 11, donde se puede observar la interfaz, el sistema de iluminación y el sistema de relieves para la lectura en Braille.

En la fase inicial de evaluación del sistema, se realizaron pruebas mediante la impresión de múltiples documentos con fragmentos de texto con distintos tamaños de fuente. El objetivo principal de este experimento era determinar el rango de tamaños de fuente para el cual el prototipo exhibía un desempeño adecuado.



Fig. 11. Prototipo construido.

El proceso de evaluación se inició con tamaños de fuente comprendidos entre 20 y 12, para así establecer los límites de funcionamiento del sistema (véase Figura 12).

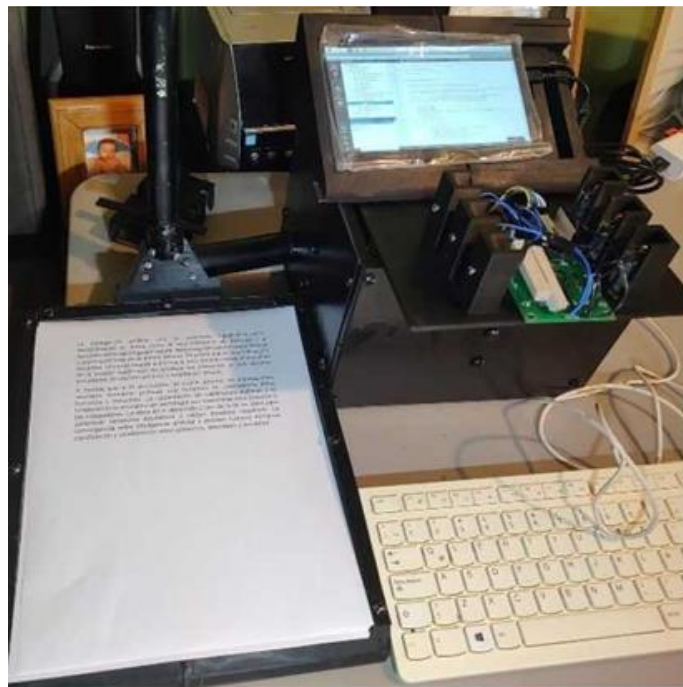


Fig. 12. Prueba del prototipo para determinar el rango de captación.

Adicionalmente, se evaluaron diversas condiciones y tipos de texto como el uso de hojas arrugadas o dobladas, cuyos resultados eran evaluados en fases posteriores. Además, se incluyeron ensayos con texto manuscrito (véase Figura 13) utilizando una diversidad de instrumentos de escritura, con el fin de ampliar la cobertura de situaciones probadas y validar la adaptabilidad del sistema.

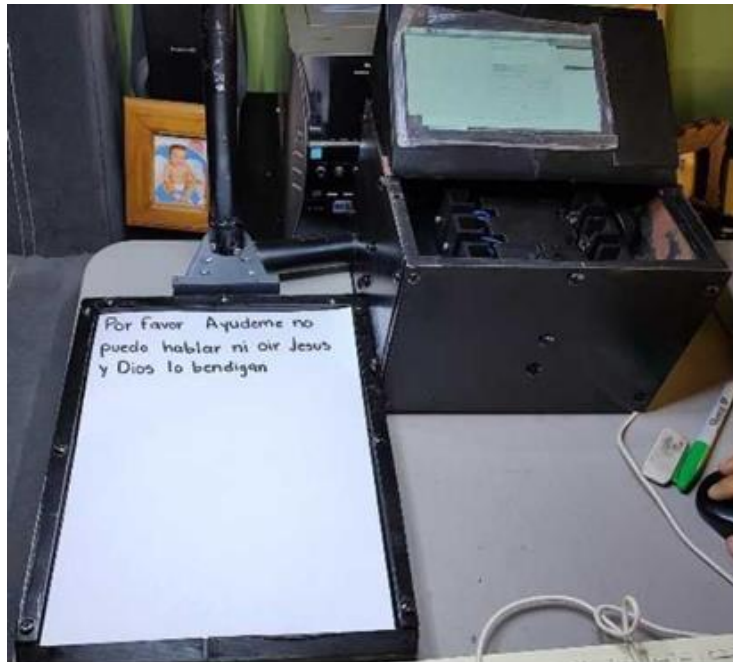


Fig. 13. Prueba utilizando letra manuscrita.

Tras la ejecución de las pruebas en el sistema, se llevó a cabo un análisis comparativo entre las palabras de entrada y salida, con el propósito de cuantificar el error inherente al sistema de reconocimiento óptico de caracteres (OCR). Este proceso de análisis y documentación permitirá la identificación de áreas de mejora para la mejora del sistema y, se derivaban recomendaciones técnicas de uso destinadas a mitigar posibles ambigüedades y confusiones para el usuario final.

En la Figura 14, se muestra una gráfica obtenida de las pruebas realizadas, donde se registra la efectividad que se tiene, donde se percató que el tamaño de los caracteres más fáciles de reconocer son del tamaño 20 hasta el 14. Dado que el OCR empleado (Tesseract) utiliza una red neuronal, se observó que, a medida que se realizaban más pruebas, la precisión del reconocimiento aumentaba.



Fig. 14. Gráfica de desempeño de reconocimiento.

En pruebas con texto en fuente Arial 12, no se reconoció nada del texto. Se continuó realizando pruebas con este tipo de texto y el reconocimiento fue aumentando su efectividad, comprobando que el entrenamiento del OCR se estaba efectuando de manera correcta. Por otro lado, se utilizaron hojas que contenían varias imágenes donde se captaban las palabras que contenían dentro de las figuras. Además, en ciertas ocasiones se confundían letras con número como el 1 con la l o el 4 con A, pero entre más pruebas se realizaban era más efectivo el reconocimiento.

Una vez que se realizaron las pruebas de reconocimiento se procedió a comprobar el funcionamiento de los actuadores, estas consistían en colocar diversos textos a reconocer y verificar que los actuadores del mecanismo se activaran correctamente y realizar el carácter deseado. Posteriormente se realizaban las mismas pruebas, buscando observar su comportamiento al de variar la velocidad; en la Figura 15, se puede apreciar un ejemplo de activación de los actuadores, en este caso la letra E, en el lado izquierdo se puede comprobar que se activaron los actuadores derechos 1 y 3 (los actuadores se enumeran de arriba hacia abajo), esto con el fin de indicar que la letra que se representará será mayúscula, en el lado derecho se aprecia que se activan los actuadores izquierdo 1 y derecho 2 indicando que le letra es la E.



Fig. 15. Implementación de los actuadores para representar la letra E.

Siguiendo con la línea de las pruebas anteriores, se presentan otros dos ejemplos que los actuadores se activaban de manera adecuada según la letra que se va representando. En la Figura 16, en el lado izquierdo se puede representar la letra g mediante los actuadores izquierdos 1 y 2, además de los derechos 1 y 2, en el lado derecho se presenta la letra n mediante los actuadores de izquierdos 1 y 3, además de los derechos 1 y 2.

Observando los resultados de la Tabla 5 se puede analizar cómo es que procede el sistema al momento de realizar las pruebas, el comportamiento que se puede observar es que, en los textos pequeños los actuadores se desempeñaban de manera adecuada y que los errores que se localizaban eran en el OCR ya que ir lo reconoce como w, sin embargo, los actuadores representaban dicha letra, de manera similar con la letra u que era reconocida como letra v, la cual se mostraba en los actuadores, es importante denotar que las textos usados para las pruebas y sus resultados involucran el uso del abecedario en minúsculas, mayúsculas y en tamaño de letras distinto.

En el caso de las siguientes pruebas, se procedió a la cuantificación de la totalidad de palabras presentes en el texto sujeto a reconocimiento. Posteriormente, se llevó a cabo una evaluación manual de las palabras identificadas por el sistema, otorgando un énfasis particular a aquellas asociadas con las acciones de los actuadores. Seguidamente, se registraron los errores inherentes a los actuadores, así como el tiempo global requerido para la presentación completa del texto.

TABLA 5. TABLA DE RESULTADOS DE PRUEBAS.

No. De Prueba	Palabras totales	Palabras reconocidas	Palabras en Actuadores	Velocidad	Observaciones
1	13	12	11	Principiante	<i>ir</i> reconocido como <i>w</i>
2	13	13	13	Principiante	<i>ir</i> reconocido como <i>w</i> , la letra <i>u</i> como <i>w</i>
3	6	5	6	Principiante	
4	6	6	6	Intermedio	
5	6	6	6	Avanzado	Una vez que se seleccionó la velocidad no cambiarla
6	196	159	159	Intermedio	Al contener muchas palabras los actuadores se llegan a trabar por calentamiento
7	98	53	53	Personalizada	
8	13	15	15	Intermedio	Por falta de iluminación el sistema agrego palabras
9	6	5	5	Intermedio	La letra <i>r</i> la confunde con <i>t</i>
10	8	7	7	Principiante	Cuando el texto se encuentra en un cambio de fondo, no se logra reconocer
11	6	5	5	Avanzado	Cuando el fondo cambia, el texto reconocido es el encuentra en el espacio blanco
12	81	77	77	Personalizada	El fondo debe de ser de un solo color, además los actuadores se llegan a sobrecalentar al interpretar mucho texto
13	166	157	157	Avanzada	La letra <i>n</i> no se logra a reconocer, además que la página tenía una mancha lo que dificulto la detección, además al ser una cantidad de letras mayor, los actuadores se calientan
14	68	7	7	Intermedio	No se recomienda el uso de fondo color negro, o general oscuros



Fig. 16. Implementación de los actuadores para representar las letras g y n.

Es relevante señalar que el texto utilizado en esta ocasión se caracterizó por las siguientes especificaciones:

- Tipo de texto: Impreso.
- Fuente: Arial.
- Tamaño de fuente: 13.
- Iluminación: Desactivada.

Considerando lo anterior, la Tabla 6 corresponde a una prueba con 23 palabras impresas en una hoja de papel, donde se obtiene un error absoluto de 3.22 palabras reconocidas y 3.26 palabras traducidas, así mismo el error relativo fue 16% y la efectividad del 84%.

Posteriormente, se llevan a cabo otro conjunto de pruebas idénticas; no obstante, en este caso se trata de un tipo diferente de texto, específicamente, texto manuscrito. Por lo tanto, el contenido utilizado en esta instancia se caracteriza por las siguientes especificaciones:

- Tipo de texto: Manuscrito.
- Iluminación: Desactivada.

En la Tabla 7 se pueden observar los mismos tipos de datos que estaban presentes en la tabla anterior, no obstante, en este escenario, los valores varían en función de los resultados obtenidos con el texto manuscrito. Uno de los datos más destacados que experimenta cambios es la eficacia, superando el umbral del 90%. En términos generales, el sistema opera de manera satisfactoria cuando se trata de un texto manuscrito. Es pertinente señalar que de las pruebas realizadas el error absoluto fue de 0.55 tanto para las palabras reconocidas como para las traducidas, el error relativo fue del 6% para ambos casos y la efectividad fue del 94%.

TABLA 6. PRUEBAS DE FIABILIDAD (IMPRESO).

No. De Prueba	Palabras Reconocidas	Palabras Traducidas	Velocidad	Tiempo total
1	23	21	Principiante	05:40
2	15	15	Intermedio	02:31
3	10	10	Avanzado	01:27
4	22	21	Personalizada	07:04
5	17	17	Avanzado	02:29
6	23	23	Intermedio	04:16
7	22	21	Personalizada	04:11
8	20	17	Personalizada	05:57
9	20	20	Intermedio	04:25
10	23	23	Principiante	03:10
11	13	13	Principiante	02:53
12	17	17	Avanzada	02:31
13	23	23	Avanzada	02:20
14	23	23	Intermedio	04:04
15	23	23	Personalizada	04:20
16	17	17	Principiante	04:51
17	23	23	Intermedio	04:15
18	23	23	Avanzada	02:33
19	23	23	Personalizada	07:16
20	23	23	Avanzada	02:34
Promedio	20.15	19.8		

TABLA 7. PRUEBAS DE FIABILIDAD (MANUSCRITO).

No. de Prueba	Palabras Reconocidas	Palabras Traducidas	Velocidad	Tiempo total
1	10	10	Principiante	2.24
2	10	10	Intermedio	01:48
3	10	10	Avanzado	01:14
4	9	9	Personalizada	03:26
5	9	9	Avanzado	01:15
6	10	10	Intermedio	01:50
7	10	10	Principiante	02:46
8	10	10	Principiante	02:27
9	10	10	Intermedio	01:56
10	10	10	Intermedio	01:52
11	9	9	Intermedio	02:02
12	10	10	Avanzado	01:18
13	10	10	Avanzado	01:25
14	10	10	Avanzado	01:14
15	10	10	Intermedio	01:52
16	10	10	Principiante	02:30
17	11	11	Personalizada	01:38
18	10	10	Personalizada	01:33
19	9	9	Personalizada	01:48
20	7	7	Avanzado	01:09
Promedio	9.7000	9.7000		

VI. CONCLUSIONES

Al evaluar el desarrollo y ejecución del sistema se destaca que se han alcanzado de manera exitosa los objetivos propuestos al inicio del documento. La planificación y la ejecución de cada fase del proyecto han culminado en un sistema que funciona de acuerdo con las expectativas planteadas, brindando soluciones efectivas y accesibles para la comunidad de personas con discapacidad visual y a la comunidad educativa buscando enseñar el lenguaje Braille.

Cabe destacar que gracias a la evaluación de los resultados y su posterior análisis es posible destacar algunas recomendaciones de uso que facilitan el uso del sistema de traducción Braille, esto con el propósito de mejorar la experiencia de usuario final y hacer una experiencia más amena al momento de usar el prototipo, entre las recomendaciones se encuentran las siguientes:

- Evitar el uso de papeles reflectores de luz como la opalina.
- No usar letras impresas de menor tamaño de Arial 13.
- Si se quiere usar letra manuscrita que sea legible y de un tamaño superior al que se encontrarla con un tamaño 16.
- Se recomienda usar palabras completas en lugar de letras solas.
- Usar la iluminación incluida solo en espacios con poca visibilidad.
- Evitar el uso de imágenes.
- Evitar el uso de letras seguidas de números.
- Evitar el uso de acentos y diéresis.
- Evitar el uso de hojas dañadas o arrugadas.
- Esperar un aproximado de 5 segundos luego de iniciar la imagen de la cámara para esperar a que enfoque adecuadamente.

A. Trabajo a futuro

- Colaborar con expertos en Braille y en tecnologías de traducción para mejorar y perfeccionar los métodos de traducción de textos impresos a Braille.
- Desarrollar una plataforma en línea fácil de usar que permita a los usuarios cargar sus textos y recibir versiones Braille de manera rápida y precisa.
- Integrar tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial y aprendizaje automático, para mejorar la precisión y velocidad de la traducción.
- Ofrecer el servicio de traducción a escuelas y universidades como parte de un programa de responsabilidad social corporativa.
- Asegurarse de que la plataforma pueda manejar diferentes formatos de entrada, como documentos de texto, archivos PDF, imágenes escaneadas, etc.
- Garantizar que la plataforma sea accesible para personas con discapacidades visuales y otras discapacidades, utilizando tecnologías compatibles con lectores de pantalla y otras ayudas.
- Implementar un sistema de retroalimentación para que los usuarios proporcionen comentarios sobre la calidad de las traducciones.
- Utilizar la retroalimentación para realizar mejoras continuas en la plataforma y en los algoritmos de traducción.
- Implementar un subsistema de botones físicos amigables con las personas con problemas visuales que permitan manipular la interfaz de usuario.
- Implementación de caracteres especiales en español como el uso de la ñ.
- Inclusión de los números en la creación de los símbolos Braille.
- Inclusión de sistema de aislamiento entre niveles.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **UHG, FMD**; Metodología: **JDP, JLP**; Software: **JDP, JLP, RCL**; Investigación: **JDP, JLP**; Redacción y preparación del borrador original: **UHG, FMD, RCL**; Redacción, revisión y edición: **UHG, FMD, RCL**; Supervisión: **UHG, FMD**; Análisis formal: **UHG, FMD**; Administración del proyecto: **UHG, FMD**; Adquisición de fondos: **UHG, FMD**.

Financiamiento: Los autores declaran que parte del proyecto se financió gracias a los proyectos SIP 20232077, 20231856 y 20232747.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al IPN y SIP por los apoyos otorgados

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] N. A. B. Alemán, L. M. Cordero, C. A. F. Salinas, Enseñanza-aprendizaje del sistema braille en el estado de Hidalgo, *Huella de la Palabra*, no. 1, 2006. <https://doi.org/10.37646/huella.vi1.462>
- [2] J. H. Carvajal Rojas, et al., "Diseño mecatrónico y desarrollo de prototipo de máquina reprogramable y flexible para dibujo en 2D," *ITECKNE*, vol. 7, no. 2, 2010. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v7i2.2718>
- [3] J. H. Carvajal Rojas, C. M. Vega Arévalo, J. P. Téllez Garay, "Diseño mecatrónico de robot móvil para transporte de carga en superficies irregulares," *ITECKNE*, 2010. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v7i1.2705>
- [4] Cámara de Diputados/ LXV Legislatura, "Declaran el 15 de octubre día nacional de las personas ciegas y con otras discapacidades visuales," *Boletín núm. 4254*, 2020.
- [5] M. S. Dutra, J. F. Archila, O. Lengerke, "Diseño Mecatrónico De Un robot tipo agv 'autonated guided vehicle'," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 7, no. 1, 2008. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/395>
- [6] J. S. Espinoza, W. C. Zaragocín, M. E. León, "Aprendizaje del sistema de lectura y escritura braille basado en las TIC," *CEDAMAZ*, vol. 12, no. 1, 2022. <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v12i1.1268>
- [7] S. R. Ramos Gallegos, "Diseño conceptual de un desgranador y clasificador de granos de maíz amiláceo por calibre y estado de conservación," Tesis, Ingeniería Mecatrónica, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería Diseño, 2021. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19332>
- [8] M. A. Guerrero, R. C. Esquivel, "Producción de materiales didácticos en el tema de sintaxis del español para personas con retinosis pigmentaria y ceguera total," *Revista Ensayos Pedagógicos*, vol. 8, no. 2, 2013. <https://doi.org/10.15359/rep.8-2.7>
- [9] M. E. Leyes Sánchez, H. W. Peñuela Meneses, "Diseño mecatrónico para una planta de tratamiento de aguas residuales en entornos de industrias textiles con énfasis en tintorerías," 2021: Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021, 21-24 septiembre, Cartagena de Indias, Colombia, 2021. <https://doi.org/10.26507/ponencia.1745>
- [10] M. Ortiz Domínguez, I. Morgado González, A. Cruz Avilés, M. A. Paredes Rueda, J. A. García Macedo, R. Velázquez-Mancilla, M. A. Flores Rentería, J. Zuno Silva, J. M. Farfán García, "Diseño Mecatrónico de un Robot de Tres Grados de Libertad Aplicando la Metodología de Nigel Cross," *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 6, no. 12, 2019. <https://doi.org/10.29057/escs.v6i12.4007>
- [11] C. F. Pérez Rivera, "Prototipo de una calculadora braille para personas con discapacidad visual en la universidad técnica de ambato," B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería en Sistemas, 2016. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24019>
- [12] A. C. González Saucedo, F. J. García Heredia, R. Ramírez Martínez, "Discapacidad visual," *Cultura Científica y Tecnológica*, no. 51, 2016. <https://revistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/954>

La regresión logística como clasificador en el diagnóstico de fallas eléctricas en un generador síncrono de imanes permanentes

Logistic regression as a classifier in the diagnostic of electrical failures in a permanent magnet synchronous generator

José Antonio **Álvarez Salas**¹, Ricardo **Álvarez Salas**², Francisco Javier **Villalobos Piña**³,
Mario Arturo **González García**⁴, Amparo **Rodríguez Cobos**⁵, J. Rafael **Molina Contreras**⁶

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0005-6530-0500 | jaas@uaslp.mx

³ ORCID: 0000-0003-1053-5642 | francisco.vp@aguascalientes.tecnm.mx

⁶ ORCID: 0000-0001-7249-9259 | jrafael.mc@aguascalientes.tecnm.mx

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO

² ORCID: 0000-0002-7646-0260 | ralvarez@uaslp.mx

⁴ ORCID: 0000-0003-4653-4895 | mgonzale@uaslp.mx

⁵ ORCID: 0009-0005-3549-7293 | amparo.rodriguez@uaslp.mx

Recibido 21/10/2024, aceptado 01/04/2025.

Resumen

En este trabajo se emplean la transformada ondeleta Haar y un clasificador binario basado en la regresión logística para identificar las fallas de cortocircuito (c.c.) entre vueltas del estator, en un generador síncrono de imanes permanentes (GSIP). El extractor de características procesa las corrientes a través de la transformada Haar empleando la descomposición multinivel, de la cual se obtienen los valores eficaces de sus coeficientes para formar junto con la función objetivo los datos que recibe el clasificador binario en el proceso de entrenamiento y validación. Ante diferentes condiciones de falla de c.c. en el estator se analizan las métricas que validan el desempeño de la regresión logística como clasificador binario. Actualmente en el diagnóstico de fallas del GSIP se requieren de algoritmos de clasificación más simples y robustos que permitan su implementación en línea. Se presentan pruebas experimentales de un banco de pruebas del GSIP en el cual se adquieren y se procesan digitalmente las corrientes que analiza el clasificador binario para el diagnóstico de la falla. Como etapa inicial en el desarrollo de los algoritmos de diagnóstico aplicados al GSIP, se comparó el desempeño ante diferentes fallas de la regresión logística, con el desempeño de un perceptrón a través de Python.

Palabras clave: clasificador binario, cortocircuito, estator, falla, generador síncrono, regresión logística.

Abstract

In this paper, the wavelet Haar transform, and a binary classifier based on logistic regression are utilized to identify short-circuit (s.c.) faults between stator windings in a permanent magnet synchronous generator (PMSG). The feature extractor processes the currents through the Haar transform, obtaining the effective values of its coefficients. These values, along with the objective function, form the data received by the binary classifier during the training and validation processes. The performance of the logistic regression as a binary classifier is analyzed under different stator fault conditions. The necessity for simpler and more robust classification algorithms in PMSG fault diagnosis allowing online implementation is evident. The test bench of a PMSG presents the currents that are analyzed by the binary classifier for the purpose of fault diagnosis. These currents are acquired and subsequently processed digitally. As a preliminary step in the development of the diagnostic algorithms applied to the PMSG, the performance of the logistic regression model was compared with that of a perceptron model using Python.

Index terms: binary classifier, logistic regression, faults, short circuit, stator, synchronous generator.

I. INTRODUCCIÓN

Las máquinas síncronas de imán permanente han tenido un incremento importante en aplicaciones como: turbinas eólicas, turbinas hidráulicas, aplicaciones marinas, vehículos eléctricos, sistemas de posicionamiento y sistemas de control de velocidad con diversas aplicaciones industriales, por su eficiencia, su relación potencia de salida-volumen, así como la elevada relación par-corriente [1].

Hoy en día es importante ofrecer confiabilidad en la operatividad de los equipos que emplean máquinas síncronas, por lo que se ha observado la necesidad de desarrollar algoritmos de diagnóstico que identifiquen diversos tipos de fallas en la máquina bajo diferentes ciclos de operación. Generalmente los algoritmos procesan las señales eléctricas o mecánicas de la máquina para obtener características que identifiquen la falla. Se forman bases de datos con las características de la señal, para realizar una clasificación ante la presencia de diferentes niveles de severidad de la falla en la máquina [2].

Se han publicado diversos trabajos en el área de diagnóstico de fallas eléctricas y mecánicas para máquinas síncronas operando como motor o generador [3], [4], [5]. Los sistemas de monitoreo y diagnóstico de fallas en la máquina síncrona emplean variables como voltajes, corrientes, velocidad, par, flujo magnético, temperatura, para ser procesadas o analizadas ante el cambio de alguna anomalía en la máquina [6]. Para la detección de fallas en el devanado del estator de la máquina síncrona operando como generador, se han formulado modelos extendidos [7], los cuales hacen uso de cambio en sus parámetros ante la presencia de la falla, otros modelos requieren conocer las configuraciones del diseño de la máquina, o simplemente las mediciones de sus variables que podrían suministrar información al modelo modificado.

En [8] se presenta un modelo de un generador síncrono de imanes permanentes que incluye fallas de cortocircuito en el devanado de la armadura, la aproximación de la función de devanado se emplea para calcular los parámetros del modelo modificado a través de las inductancias del entrehierro que considera todos los armónicos espaciales, así como las inductancias de dispersión que emplean el método de la permeancia. Una combinación de un modelo modificado con las redes de secuencia de sus variables puede diagnosticar fallas en el estator como se indica en [9], a través de la comparación de las magnitudes de las corrientes de secuencia positiva y negativa que provee el modelo de la máquina con los parámetros modificados, se detectan fallas múltiples en la máquina como son: circuito abierto, cortocircuito entre espiras y desmagnetización en el rotor. Empleando simulación por medio del método de elemento finito con mapas de flujos magnetostáticos y mediciones eléctricas de la corriente transitoria de la máquina síncrona de imanes permanentes operando como motor, se diagnostican fallas de cortocircuito en el estator [10]. La estimación paramétrica también se ha utilizado en el diagnóstico del generador síncrono de imanes permanentes, un ejemplo es el desarrollo de un filtro de Kalman simplificado y un filtro de Kalman extendido para la detección de fallas entre vueltas de una de las fases del generador síncrono de imanes permanentes [11].

Los modelos de la máquina síncrona se han combinado con procesamiento de las señales y métodos de aprendizaje automático como se indica en [12], en este trabajo la señal de corriente se adquiere para ser procesada y transformada en un modelo con un factor que incluye la falla en el estator en el marco de referencia d-q. A partir de esta transformación se realiza la extracción de la amplitud del segundo armónico de corriente por medio de la transformada de Fourier y se compara con un método de extracción armónico basado en la red neuronal Adeline. Sin embargo, el método de diagnóstico basado solo en señales es muy útil cuando no se puede obtener fácilmente un modelo y los datos son abundantes en información [13]. El diagnóstico basado en señales ha tenido un importante desarrollo en investigación en los últimos años, debido a que su implementación en plataformas de tiempo real, no requiere del conocimiento interno de la máquina y sólo utiliza sensores que monitorean las señales externas de la máquina [14]. En [15] un generador síncrono de imanes permanentes se presenta el diagnóstico de cortocircuitos entre espiras y desbalances mecánicos en el rotor. A través de la medición del par y la velocidad, el procesamiento de estas señales con la transformada ondeleta, permite generar

3

una relación entre el par y la velocidad como indicador de la presencia de la falla. Con la transformada de Fourier de tiempo corto y la transformada ondeleta discreta se realiza el procesamiento de las corrientes en un motor síncrono de imanes permanentes, que permite identificar fallas entre espiras a través de las firmas de corriente en el dominio tiempo-frecuencia [16].

Como parte de los sistemas de monitoreo y diagnóstico de fallas en la máquina síncrona, se han implementado configuraciones con tres etapas básicas como son: la etapa de adquisición de las señales a través de transductores, la etapa de procesamiento de las señales a la cual se le conoce como extractor de características y la etapa de clasificación, la cual usa la información para asignar a los datos de entrada a un número finito de categorías y se pueda diagnosticar la máquina [17]. Al integrar estas etapas e incrementar la complejidad de los algoritmos que procesan y clasifican las señales se puede realizar el diagnóstico de fallas múltiples en la máquina síncrona como se indica en [18], donde se diagnostica a través de las señales de corriente un motor síncrono de imanes permanentes con diferentes fallas. Se utiliza el procesamiento de la señal por medio de una ondeleta empaquetada y el clasificador es una red neuronal de convolución 1-D profunda que incluye la función exponencial normalizada. Se pueden simplificar parte de las tareas de entrenamiento del clasificador a través de Python de acuerdo a lo que se indica en [19], donde se utilizó un análisis biespectral para el procesamiento de la señal de corriente que detecta fallas en el devanado del estator, y en la clasificación se empleó una red neuronal convolucional. Es importante señalar que a pesar de que se han robustecido las tareas de diagnóstico de fallas en la máquina síncrona, ha surgido un reto importante, la implementación de algoritmos capaces de operar simultáneamente con los esquemas de control que algunas aplicaciones requieren hoy en día. Tales condiciones involucran la necesidad de desarrollar algoritmos mucho más simples y precisos en las etapas del extractor de características y el clasificador para que puedan ser implementadas en plataformas digitales en línea [20].

En este trabajo a través de las mediciones y procesamiento de las corrientes de un GSIP integrado a un banco de pruebas, se diagnostican fallas eléctricas en el devanado del estator. El objetivo del banco es desarrollar un sistema de diagnóstico de fallas con un carácter no invasivo que dependa sólo de las mediciones de las corrientes y pueda operar en línea. Como primera etapa en la selección y desarrollo de los algoritmos de diagnóstico, se presentan los resultados de un clasificador binario a través de los algoritmos como son el perceptrón y la regresión logística (siendo uno de los algoritmos más simples que se han utilizado en el aprendizaje automático). De acuerdo con los resultados en la validación de estos algoritmos, se proyectan emplear algoritmos más complejos en base a redes neuronales o algoritmos probabilísticos con tareas de clasificación. La selección del extractor de características debe considerar señales en estado permanente o transitorio, de ahí la necesidad de emplear las ondeletas Haar con una estructura relativamente simple en su cálculo. Una vez seleccionada la combinación extractor de características y su clasificador, en una siguiente etapa se implementarán estos algoritmos en una plataforma digital que permita monitorear y diagnosticar al GSIP en línea con diferentes perfiles de velocidad. Este artículo queda limitado a los resultados obtenidos de los algoritmos de clasificación propuestos, debido a que es una etapa inicial del banco de pruebas del GSIP para el diagnóstico de fallas de cortocircuitos entre las espiras de una fase del estator. En la siguiente sección, se realiza una revisión de los fundamentos básicos del extractor de características y el clasificador binario que se emplean en los algoritmos que se procesan en el banco de pruebas del GSIP. Se presentan los resultados del extractor de características de la transformada ondeleta Haar y los resultados del entrenamiento y validación de la regresión logística a través de Python.

II. DESARROLLO

En la Fig. 1 se indica el diagrama a bloques del aprendizaje supervisado, con los datos de entrada se entrena al algoritmo de aprendizaje para que se genere un modelo predictivo capaz de producir resultados o predicciones una vez que al modelo se le ingresen nuevos datos. El aprendizaje supervisado puede emplearse para regresión (predice un dato continuo) y clasificación (predice la categoría correcta) [21].

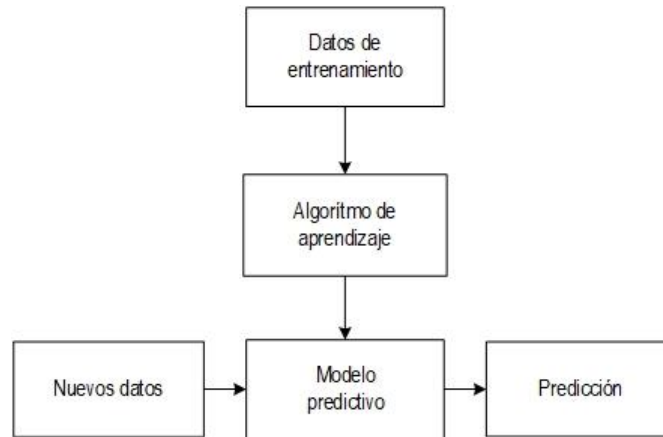


Fig 1. Diagrama a bloques del aprendizaje supervisado.

La clasificación es una subcategoría del aprendizaje supervisado, cuyo propósito es predecir la salida o función objetivo en una nueva clase a través de observaciones pasadas del algoritmo de aprendizaje. La función objetivo de la nueva clase son valores binarios y desordenados, cuyo propósito es agruparlos en una nueva categoría considerando determinadas reglas en el ordenamiento [4]. Los algoritmos de clasificación deben ser capaces de separar las condiciones de no falla y falla de los datos que proporcione la transformada ondeleta Haar de las señales de corriente. En las siguientes secciones se describe la teoría básica del clasificador binario, el extractor de características y las métricas que se emplean en la validación de los algoritmos del clasificador.

A. Clasificador binario

El perceptrón es un clasificador binario, que forma parte del aprendizaje supervisado. Es la unidad base de las redes neuronales, se forma por una sola neurona con pesos y un umbral ajustable. Se puede definir una función de decisión $\emptyset(z)$ que toma una combinación lineal de las entradas “x” y sus correspondientes pesos “w”, donde “z” es denominada la función de entrada como se indica en la ecuación (1):

$$z = w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + w_4x_4 + \cdots w_nx_n \quad (1)$$

simplificando la función z se tiene la ecuación (2):

$$z = \sum_{j=0}^m w_jx_j \quad (2)$$

Si la entrada es mayor que el umbral θ , se predice una clase o etiqueta 1, y si es menor que el umbral se predice una clase o etiqueta -1.

$$\emptyset(z) = \begin{cases} 1 & \text{si } z \geq \theta \\ -1 & \text{si } z < \theta \end{cases} \quad (3)$$

En el aprendizaje supervisado el umbral negativo o peso es denominado usualmente como unidad de sesgo. Los pesos se actualizan simultáneamente, lo que implica que los valores de la predicción no se recalculan antes de la predicción [22].

En la Fig. 2, se muestra un diagrama a bloques de los elementos básicos del perceptrón. Las entradas son multiplicadas por los pesos y sumadas en la función “z”, junto con el sesgo el cual puede ser representando por el valor del peso w_0 . El valor de “z” corresponde a la función de la sumatoria en la Fig. 2. El error permite el ajuste de los pesos.

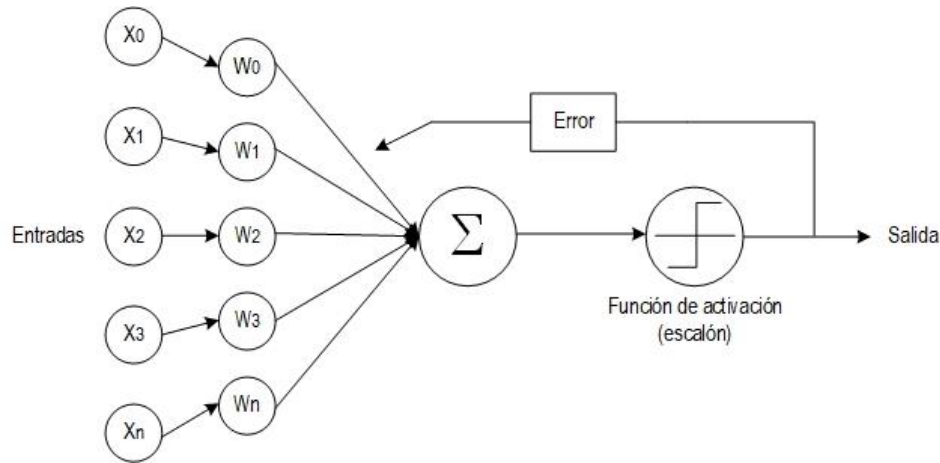


Fig. 2. Diagrama básico de un perceptrón con escalón.

La regresión logística es un modelo de clasificación binaria, cuando el conjunto de datos son linealmente separables. La regresión logística emplea las entradas y pesos del perceptrón, pero experimenta un cambio en su función de activación. Si en la ecuación (2) su función de activación emplea una función sigmoide como se indica en la ecuación (4), el algoritmo es considerado como regresión logística:

$$\varphi(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4)$$

En la Fig. 3 se muestra la figura de la curva sigmoide, donde se puede observar que la función de activación tiende a 1 si “z” adquiere un valor infinito. De igual forma “z” adquiere el valor de 0 cuando adquiere un valor infinito negativo, por lo cual actúa como la función de activación del perceptrón.

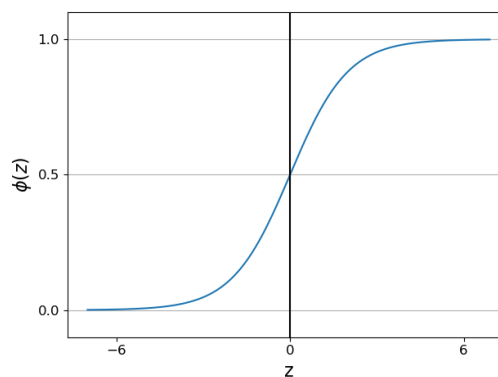


Fig. 3. Curva sigmoide.

La diferencia de la función sigmoide radica en el valor de la pendiente que permite una clasificación binaria más precisa para los datos de entrada que tienen que ser procesados.

En la Fig. 4 se muestra un diagrama a bloques de la regresión logística, el error permite el ajuste de los pesos y el sesgo para su entrenamiento. A través del error cuadrático de la diferencia de su función de activación y su salida, se permite una mejor predicción [22].

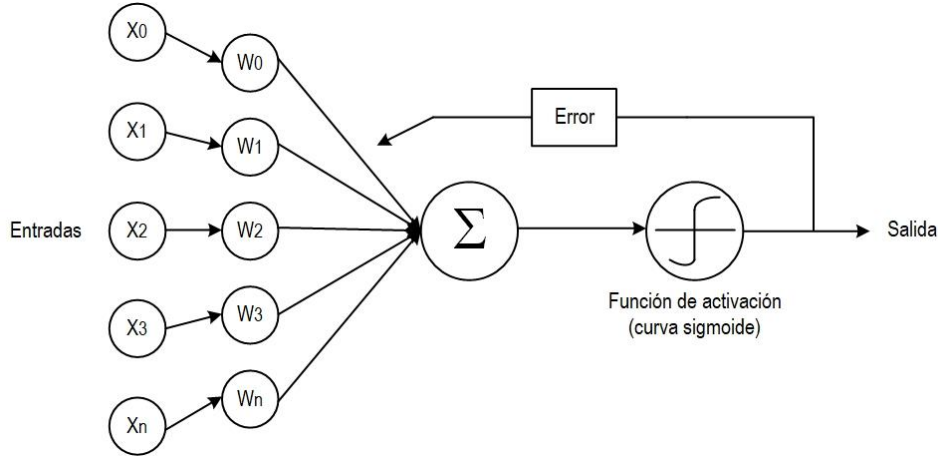


Fig. 4. Diagrama básico de un perceptrón con regresión logística.

B. Extractor de características

La función ondeleta es una onda que puede tener una forma irregular y una duración limitada en tiempo en la cual se concentra la energía de la señal. [23]. La transformada ondeleta puede implementarse en tiempo discreto y se le denomina transformada ondeleta discreta.

Una señal discreta es una función del tiempo con valores ocurriendo en instantes discretos.

$$f = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_n) \quad (5)$$

Estos valores son típicamente medidos de una señal analógica “g”

$$f_1 = g(t_1), \dots, f_2 = g(t_2), \dots, f_n = g(t_n) \quad (6)$$

La transformada ondeleta Haar se descompone en dos subseñales discretas de la mitad de su longitud [23].

- Una subseñal representa el promedio o la tendencia
- La otra señal representa la diferencia o fluctuación

La subseñal de la tendencia se calcula con la ecuación (7):

$$a_n = \frac{f_{2n-1} + f_{2n}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

La subseñal de la fluctuación se calcula de acuerdo con la ecuación (8):

$$d_n = \frac{f_{2n-1} - f_{2n}}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

La forma general de la tendencia y la fluctuación en el término del n -ésimo se define por las ecuaciones en (9):

$$a^n = \frac{a^{n-1}[2n-1] + a^{n-1}[2n]}{\sqrt{2}} \quad d^n = \frac{d^{n-1}[2n-1] + d^{n-1}[2n]}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

para $n=1, 2, 3, 4 \dots N/2$

7

En general la descomposición del número de niveles de los coeficientes de la ondeleta a las diferentes bandas de frecuencia se define por la ecuación (10) [24]:

$$n = \left\lceil \frac{\log\left(\frac{f_s}{f_{señal}}\right)}{\log(2)} \right\rceil \quad (10)$$

donde

f_s es la frecuencia a la cual se muestrea la señal

$f_{señal}$ es la frecuencia de la señal original

n debe ser un número entero.

En el procesamiento de las señales a través de la ondeleta madre discreta, es común obtener el valor eficaz de los coeficientes de las tendencias y fluctuaciones, para los diferentes niveles en que se descompone la señal. En la ecuación (11) se define el valor eficaz de los coeficientes [23].

$$V_{rmsj} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^n |M_{jk}(n)|^2} \quad (11)$$

donde

j y k son los niveles de la descomposición de las subseñales

N es el número de muestras de la señal

M_{jk} es la magnitud de las componentes de las subseñales

n es el número de los términos del valor eficaz de las subseñales

C. Métricas

Las métricas en el aprendizaje supervisado permiten validar el desempeño de sus algoritmos como son los clasificadores. En este trabajo se emplearon las métricas o índices de desempeño que validan al clasificador ante los escenarios de falla establecidos en el diseño del banco de pruebas del GSIP. A continuación, se describen las métricas utilizadas en la validación de los algoritmos de clasificación empleados en este trabajo.

La matriz cuadrada de confusión es un indicador, el cual permite visualizar los errores individuales y relativos del clasificador. Se puede decir que dicha matriz cómo el sistema confunde escenarios de falla con respecto a N datos conocidos y permite evaluar funciones probabilísticas de cada escenario de falla. En la Fig. 5 se indica la gráfica del arreglo de la matriz de confusión [25]. La matriz incluye verdaderos positivos y falsos positivos, que son aquellos datos que se asocian con los aciertos de la clasificación. Los falsos positivos y falsos negativos, se asocian con los desaciertos de la clasificación.

		Predicción	
		Simétrico	Falla
Clase Real	Simétrico	Verdadero Positivo	Falso Negativo
	Falla	Falso Positivo	Verdadero Negativo

Fig. 5. Matriz de confusión.

La curva característica de operación recibida, ROC (Receiver Operating Characteristic) es un índice gráfico que describe las clasificaciones correctas con respecto a las falsas alarmas. Para problemas de clasificación el umbral de decisiones es binario, es decir si la falla se clasifica correctamente se le asigna 1, de otro modo se asigna un 0. Se grafican entre las relaciones de la sensibilidad y la especificidad. La sensibilidad o probabilidad de clasificación se define como una relación de la ecuación (12).

$$Sens = \frac{VP}{VP + FN} \quad (12)$$

donde VP son los verdaderos positivos y FN son los falsos negativos que emite el clasificador binario.

La especificidad o probabilidad de falsas alarmas se define como una relación de la ecuación (13).

$$Espec = \frac{FP}{FP + VN} \quad (13)$$

donde FP son los falsos positivos y VN son los verdaderos negativos que emite el clasificador binario. En la Fig. 6 se muestra la curva ROC, dado que mientras es mayor el área bajo la curva es mejor el desempeño del clasificador. La curva ROC semejante a la línea recta de 45° denota un clasificador muy ineficiente [25].

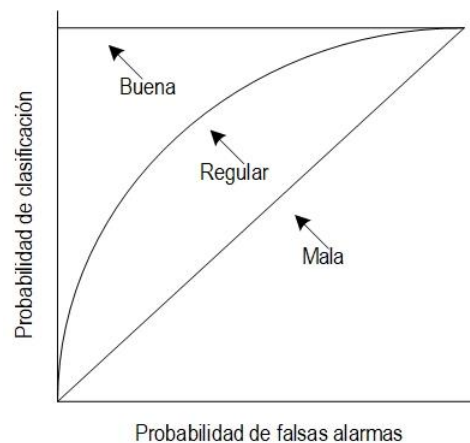


Fig. 6. Funciones de probabilidad y la relación con la curva ROC.

La exactitud se define como una relación entre los aciertos y el total de las predicciones como se indica en la ecuación (14):

$$Exac = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (14)$$

donde VP son los verdaderos positivos, VN son los verdaderos negativos, FP son los falsos positivos y FN son los falsos negativos que emite el clasificador binario.

9

Cada una de las métricas permite proporcionar información complementaria sobre los resultados que se obtienen del clasificador para valorar su desempeño.

III. RESULTADOS

En esta sección se presenta el análisis de datos de las corrientes del generador de imanes permanentes de 400 W, en condiciones de simetría y con las fallas en diferente número de vueltas. Se emplea en el procesamiento de las señales de las corrientes, la transformada ondeleta Haar y en el clasificador dos algoritmos de aprendizaje supervisado que se analizaron en la sección anterior. Los datos nominales del generador de imanes permanentes se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1
VALORES NOMINALES DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.

Potencia (W)	Voltaje (V)	Conexión trifásica	Velocidad (rpm)	Polos	Tipo
400	12	Y	400	12	Imanes Permanentes

Dos fases han sido modificadas con derivaciones de 1 a 7 vueltas en dos de las fases del generador. A partir de estas configuraciones se puede realizar una combinación en cada fase o entre fases para generar fallas en el generador que modifiquen las señales de tensión y corriente [26].

En la Fig. 7 se muestra el banco de pruebas del GSIP para obtener las señales de las corrientes y procesarlas a través del extractor de características definido por los valores eficaces de los coeficientes de las tendencias y fluctuaciones de la transformada ondeleta Haar. Estos coeficientes son las entradas de los algoritmos de clasificación correspondientes al perceptrón y la regresión logística. Una vez entrenado el clasificador binario permite diagnosticar al GSIP en su devanado de estator en condiciones sin falla y condiciones con falla.

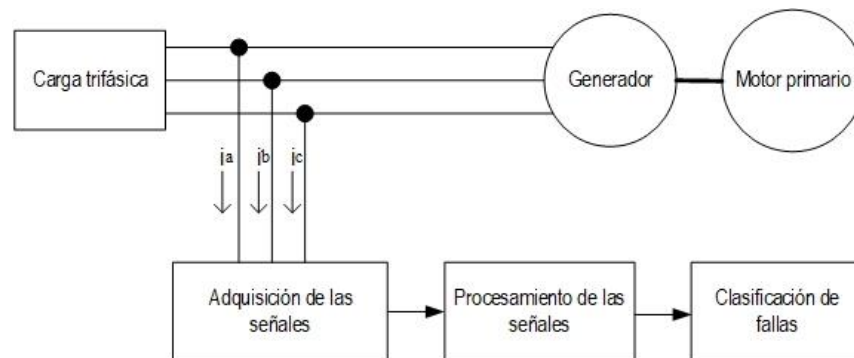


Fig. 7. Diagramas del banco de pruebas para el generador síncrono de imanes permanentes.

En la Fig. 8 se muestra una imagen de la implementación del banco de pruebas del GSIP con sus derivaciones y acoplamiento al motor de corriente directa. En el circuito de prueba para la adquisición de las corrientes con una carga trifásica resistiva en las terminales del generador, se emplean sensores de efecto Hall, posteriormente entran a una etapa de acondicionamiento de señales para ser procesadas en la unidad de procesamiento digital de señales a través de un dsPIC30F4011. El sistema de control regula la velocidad en un motor de corriente directa, como motor primario para que impulse al GSIP. Por medio del sistema de control implementado en el dsPIC30F4011, se genera el patrón de control de velocidad en el motor de corriente directa [26].

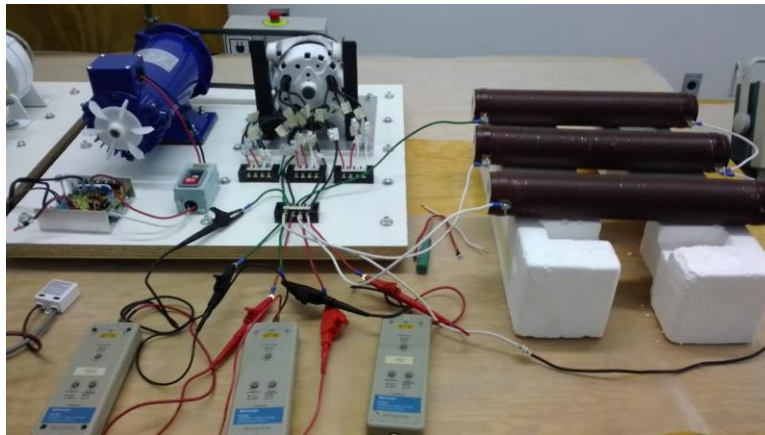


Fig. 8. Imagen del banco de pruebas para el generador síncrono de imanes permanentes.

En la Fig. 9 se muestran los voltajes del generador con una falla de 1 vuelta en la fase A. Por la presencia de la falla de cortocircuito, dos voltajes de línea reducen su amplitud respecto al tercer voltaje de línea. El voltaje de línea se genera a una velocidad de 200 rpm.

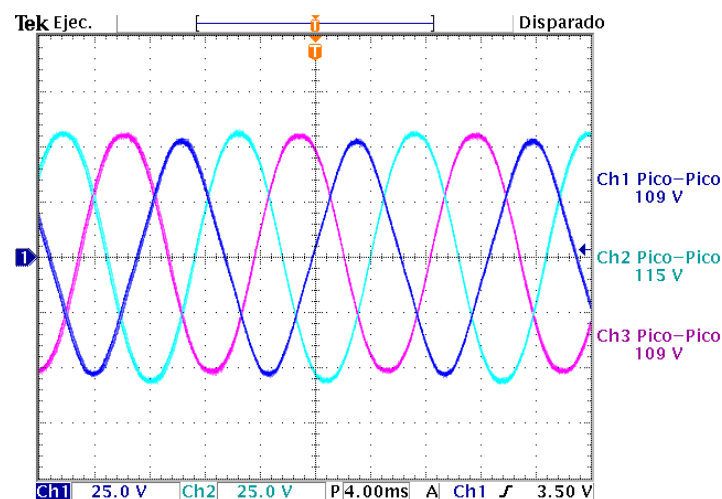


Fig. 9. Voltajes del generador considerando una falla de una vuelta.

En la Fig. 10 se muestran las tres corrientes del generador de imanes permanentes, considerando una falla de una vuelta en la fase A. La reducción de la amplitud de la fase A es mínima por la falla más incipiente del devanado del GSIP. Cuando se incrementan las vueltas en cortocircuito, la amplitud de la señal de corriente se reduce aún más. En las pruebas del GSIP se utilizó una velocidad de la operación del motor primario a 200 rpm, obteniendo señales de corriente a una amplitud y frecuencia de 2 A, 20 Hz y una frecuencia de muestreo de 1kHz.

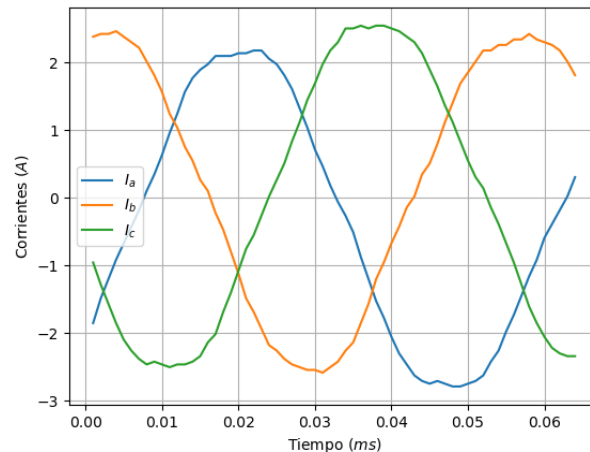


Fig. 10. Corriente del generador considerando una falla de una vuelta.

Se emplearon los cuatro primeros niveles de la transformada ondeleta en la descomposición multinivel, debido a que las adquisiciones de las corrientes en la frecuencia 20 Hz producen las componentes al doble de la frecuencia fundamental de la corriente por la presencia del cortocircuito entre vueltas en el estado permanente. El valor eficaz de los coeficientes se calculó por medio de la ecuación (11) para los cuatro niveles de la transformada ondeleta Haar de acuerdo con la ecuación (10).

En la Tabla 2 se presentan los valores eficaces de los coeficientes considerando las condiciones de simetría y con las diferentes fallas en el estator del GSIP. Los valores eficaces de las tendencias son los coeficientes A_1 , A_2 , A_3 y A_4 . Los valores eficaces de las fluctuaciones son los coeficientes D_1 , D_2 , D_3 y D_4 . Se encuentran ordenados considerando el incremento de la falla en la fase A.

TABLA 2
VALOR EFICAZ DE LOS COEFICIENTES DE LA ONDELETA MADRE HAAR.

Condición	A_1	A_2	A_3	A_4	D_1	D_2	D_3	D_4
Simétrico	4.4315	6.2663	8.8595	12.5240	0.0474	0.1053	0.2060	0.3619
1 vuelta fase A	4.4220	6.2527	8.8402	12.4968	0.0465	0.1043	0.2098	0.3615
4 vueltas fase A	4.4560	6.3008	8.9084	12.5670	0.0486	0.1057	0.2065	0.3505
7 vueltas fase A	4.4496	6.2918	8.8952	12.5740	0.0486	0.1090	0.2178	0.3810

TABLA 3
DATOS DE ENTRADA DE LOS ALGORITMOS DE APRENDIZAJE.

Coefficientes	Simétrico	Salida y	1 vuelta fase A	4 vueltas fase A	7 vueltas fase A	Salida y
A ₁	4.431583	0	4.4222	4.4561	4.4492	1
A ₂	6.2659	0	6.2536	6.3011	6.2899	1
A ₃	8.8905	0	8.8423	8.9868	8.8886	1
A ₄	12.5246	0	12.5068	12.5772	12.5840	1
D ₁	0.0265	0	0.0270	0.0299	0.0311	1
D ₂	0.0779	0	0.0829	0.0874	0.0873	1
D ₃	0.1838	0	0.1829	0.1807	0.1865	1
D ₄	0.3619	0	0.3615	0.3505	0.3810	1

Los datos de entrada de los algoritmos de aprendizaje automático, se formaron con los valores eficaces de los coeficientes, en condiciones de simetría y tres tipos de fallas entre vueltas del estator, además de la función objetivo que clasifica la condición de los datos sin falla o con falla a través de los valores 0 y 1 como se indican en la Tabla 3. Los datos se encuentran ordenados de acuerdo a su banda de frecuencia de la descomposición multinivel de la ondeleta. Estos datos se dividen en 70% de los valores para entrenar al algoritmo de aprendizaje y 30 % de los valores para la validación del modelo una vez que se ha entrenado. Adicionalmente a los datos se les efectúa un tratamiento de la información, es decir, se realizó un escalado y una estandarización. Este proceso permite que no presenten desviaciones muy grandes entre los valores mínimos y máximos dentro del conjunto de datos y no dificulte al algoritmo el proceso de aprendizaje.

Como parte de la validación de los modelos utilizados en las tareas de clasificación se emplearon tres métricas para verificar el desempeño de los algoritmos, como se indicó en la sección anterior. La primera métrica es la matriz de confusión, que separa las posibles combinaciones de los aciertos o desaciertos estimados por el modelo de clasificación binaria. En la Tabla 4 se presentan los resultados con los datos de prueba de la matriz de confusión y en la Tabla 5 se presentan los resultados de la matriz de confusión con los datos de entrenamiento para el algoritmo del perceptrón. Las Tablas 6 y 7 presentan los resultados de la matriz de confusión para el algoritmo de la regresión logística. Los datos de entrenamiento y prueba son complementarios de acuerdo con la partición 70% y 30%, por lo que la información de ambas tablas en cada uno de los tres escenarios de falla, debe contener un total de 60 datos.

TABLA 4
MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL PERCEPTRÓN CON LOS DATOS DE PRUEBA.

Condición Simétrico-Falla	Verdaderos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Positivos	Falsos Negativos
1 vuelta fase A	4	3	8	3
4 vueltas fase A	7	10	1	0
7 vueltas fase A	7	11	0	0

TABLA 5
MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL PERCEPTRÓN CON LOS DATOS DE ENTRENAMIENTO.

Condición Simétrico-Falla	Verdaderos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Positivos	Falsos Negativos
1 vuelta fase A	18	11	8	5
4 vueltas fase A	23	19	0	0
7 vueltas fase A	23	19	0	0

TABLA 6
MATRIZ DE CONFUSIÓN DE LA REGRESIÓN LOGÍSTICA CON LOS DATOS DE PRUEBA.

Condición Simétrico-Falla	Verdaderos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Positivos	Falsos Negativos
1 vuelta fase A	4	3	8	3
4 vueltas fase A	7	11	0	0
7 vueltas fase A	7	11	0	0

TABLA 7
MATRIZ DE CONFUSIÓN DE LA REGRESIÓN LOGÍSTICA CON LOS DATOS DE ENTRENAMIENTO.

Condición Simétrico-Falla	Verdaderos Positivos	Verdaderos Negativos	Falsos Positivos	Falsos Negativos
1 vuelta fase A	18	13	6	5
4 vueltas fase A	23	19	0	0
7 vueltas fase A	23	19	0	0

En las matrices de confusión de la regresión logística y el perceptrón cuando se clasifica la falla de 1 vuelta en cortocircuito, generan una cantidad importante de falsos positivos y negativos. Los modelos no son capaces de generar las predicciones correctas sin falla o con falla en las corrientes del GSIP. Como se puede observar en las tablas de la regresión logística y el perceptrón con una falla de 4 vueltas, el desempeño de ambos clasificadores mejora ya que produce solo verdaderos positivos y negativos.

La segunda métrica utilizada para evaluar el desempeño de los algoritmos son las curvas ROC, las cuales representan la sensibilidad en función de los falsos positivos para los diferentes escenarios de la falla en el GSIP. De la Fig. 11 a la Fig. 13 se muestra la comparativa de las curvas ROC del algoritmo perceptrón y la regresión logística. De acuerdo con la Fig. 11a y la Fig. 11b, la respuesta del clasificador binario en ambos algoritmos es regular, se presentan algunos falsos positivos lo que reducen los verdaderos positivos.

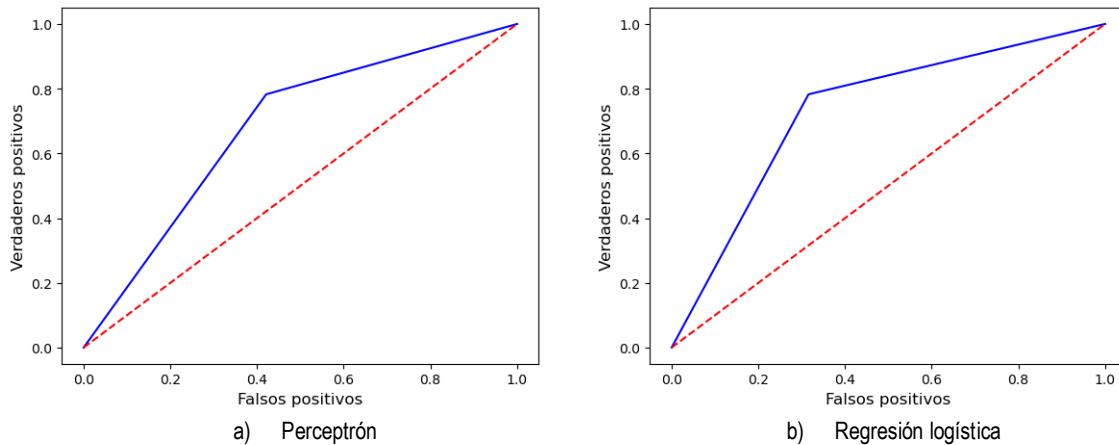


Fig. 11. Curvas ROC considerando una falla de 1 vuelta en la fase A.

Para que en las curvas ROC se muestre un buen desempeño del clasificador, la probabilidad de clasificación debe alcanzar el valor unitario como se indica en la Fig. 6 es decir, en el cálculo de la sensibilidad no existen falsos negativos y en la especificidad no existen falsos positivos. En la Fig. 12a y la Fig. 12b de las curvas ROC para los dos modelos todas se encuentran por arriba de la línea del umbral con una probabilidad de clasificación unitaria, lo que significa que el clasificador tiene un buen desempeño. En la Fig. 13a y la Fig. 13b las curvas

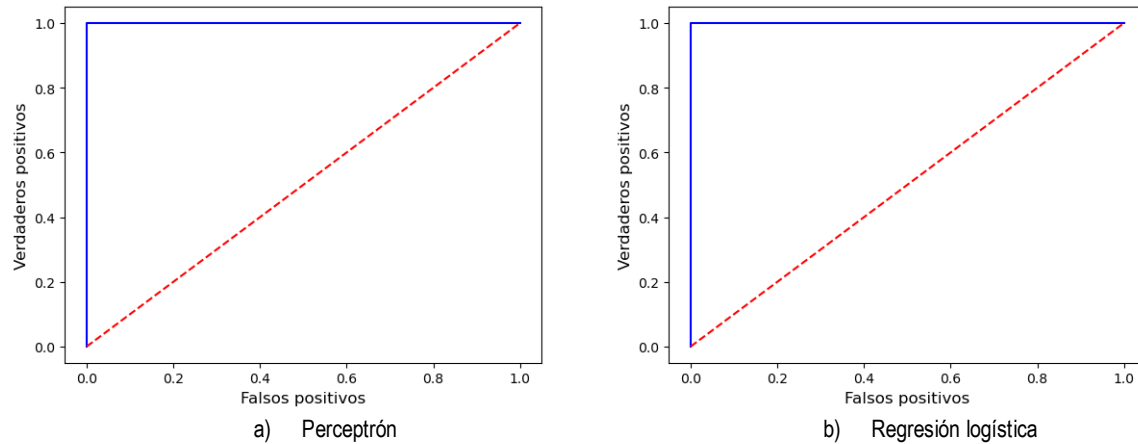


Fig. 12. Curvas ROC considerando una falla de 4 vueltas en la fase A.

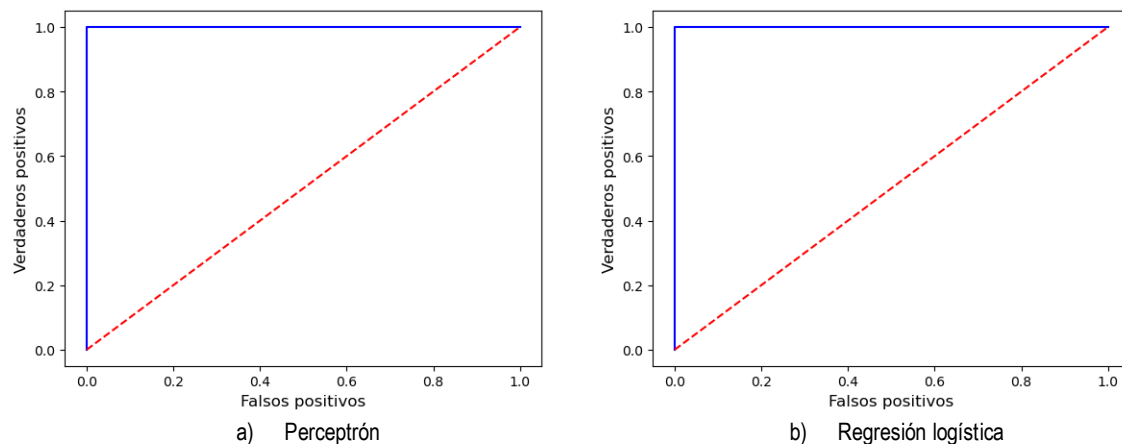


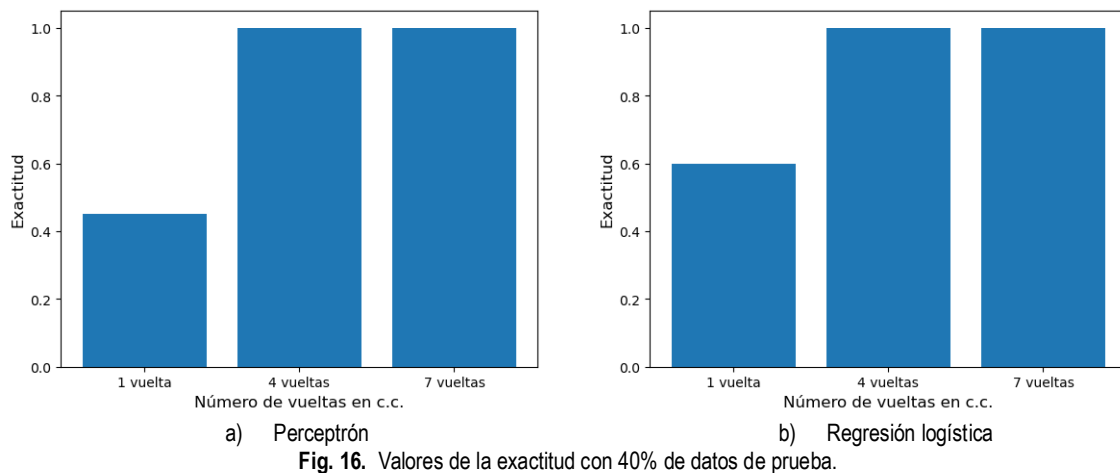
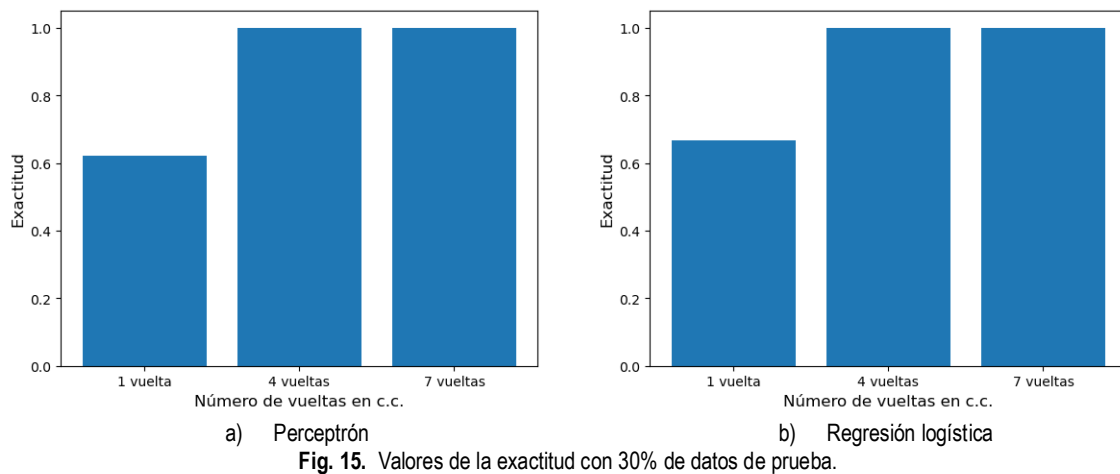
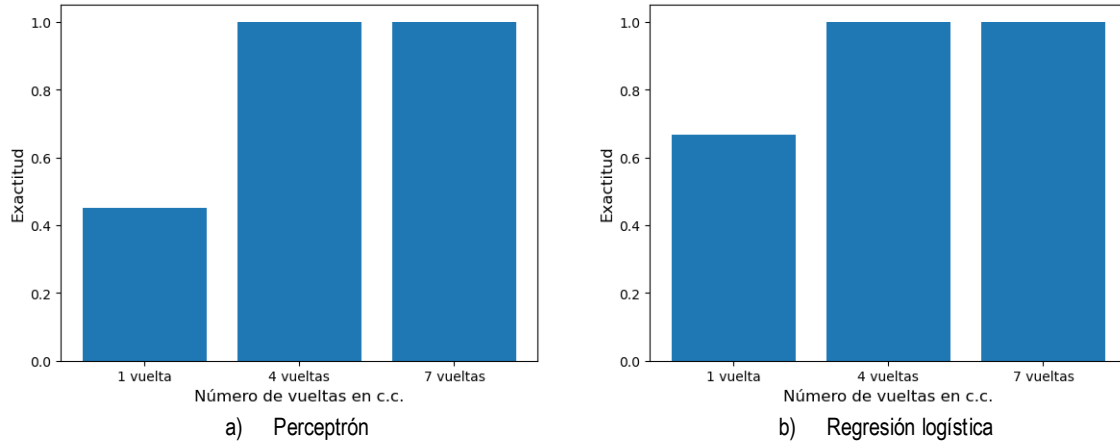
Fig. 13. Curvas ROC considerando una falla de 7 vueltas en la fase A.

La tercera métrica es la exactitud, la cual de acuerdo a la expresión (14) establece la relación de los aciertos respecto al total de las predicciones, el valor unitario representa el mejor desempeño del clasificador. En las Figs. 14, 15 y 16 para ambos algoritmos utilizados, se realiza una validación con diferentes proporciones de los datos de prueba. Se modifican los porcentajes de 20%, 30% y 40% de los datos de prueba, con las tres fallas del GSIP, cuyo propósito fue analizar el impacto que tendría sobre el cálculo de la exactitud. Se puede observar en las figuras que en los tres casos de cambio en la proporción de los datos de prueba, el desempeño de ambos algoritmos es regular ante la falla de 1 vuelta, mientras que para las dos restantes fallas el desempeño de ambos algoritmos es el mejor. Se alcanza a notar una ligera mejora en la exactitud de la regresión logística respecto al perceptrón cuando se considera la falla de 1 vuelta, esto se debe a la función de activación que emplean ambos algoritmos.

El análisis de los resultados de las tres métricas aplicado a los dos algoritmos permite validar el desempeño del clasificador binario utilizado en el GSIP. Para los tres escenarios de falla diagnosticados, el desempeño del clasificador es regular para la falla de una 1 vuelta de acuerdo a los resultados de las métricas. El resultado

anterior es importante considerar al momento de seleccionar el algoritmo del clasificador, ya que no sólo debe contar con una estructura relativamente simple para su implementación, sino que debe ser capaz de lograr el mejor desempeño en todas las combinaciones posibles de fallas a diagnosticar en el GSIP.

15



Debido a que los algoritmos reciben los datos sin falla y con falla de los coeficientes de la transformada ondelata Haar como se indica en la Tabla 3, no todos los coeficientes de las tendencias y fluctuaciones tienen una variación significativa de su valor eficaz entre ambas condiciones. En general, los coeficientes incrementan su valor eficaz a medida que la asimetría de las fallas es mayor. Una falla de varias vueltas tendrá una diferencia más significativa que una falla de pocas vueltas en sus valores eficaces de los coeficientes. Esta condición tiene impacto en el procesamiento que realiza el clasificador, cuando trata de seleccionar fallas de incipientes.

IV. CONCLUSIONES

En la búsqueda de un diagnóstico confiable y con una estructura relativamente simple, se desarrolla en una primera etapa un banco de pruebas de un GSIP que utiliza algoritmos en base a la transformada ondeleta Haar como extractor de características y la regresión logística como clasificador binario, para la detección de fallas de cortocircuito en el estator del GSIP. La implementación de la transformada Haar en las primeras bandas de frecuencia, presenta una variación del valor eficaz de sus coeficientes al considerar la condición sin falla y con la falla del estator. El resultado anterior contribuye significativamente al proceso de clasificación binaria. El clasificador binario emplea un algoritmo con la regresión logística, con estructura relativamente simple para su implementación. Se utilizaron una base fija de datos proveniente del extractor de características, los cuales a través de la función de activación sigmoide de la regresión logística fueron clasificados. Se emplearon tres métricas para validar el desempeño de la regresión logística ante los tres escenarios de falla, comparado con el desempeño de un algoritmo perceptrón el cual emplea una función de activación en escalón. En la validación de los algoritmos de clasificación para la falla de 1 vuelta de cortocircuito, se tuvo un desempeño regular, mientras que para las fallas de 4 vueltas y de 7 vueltas se tuvo un buen desempeño. Tanto la regresión logística como el perceptrón son algoritmos sensibles a la variación y tamaño de los datos que buscan clasificar. El clasificador mantiene la ventaja de generar una implementación relativamente simple, pero tiene la desventaja de no generar una sensibilidad ante la presencia de fallas incipientes. Como etapa subsecuente se buscará modificar el número de datos a procesar en el extractor de características que impacten directamente en el clasificador y probar algoritmos más complejos en la clasificación en base a redes neuronales o en base a sistemas probabilísticos, para mejorar la sensibilidad en la clasificación de fallas incipientes.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **JAAS, RAS**; Metodología: **JAAS, RAS**; Software **JAAS**; Investigación: **JAAS, RAS**; Redacción y preparación del borrador original: **JAAS**; Redacción, revisión y edición: **JAAS, RAS, FJVP, MAGG**; Supervisión: **FJVP, MAGG, ARC, JRMC**; Análisis formal: **JAAS, RAS**; Administración del proyecto: **FJVP, MAGG**; Adquisición de fondos: **JAAS, RAS, FJVP, MAGG**.

Financiamiento: Los autores agradecen el apoyo recibido de los Cuerpos Académicos **Sistemas Electromecánicos y Energía Sustentable y Automatización y Control de Sistemas**.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen a Ana Cecilia **Rivera Rivera** por el apoyo recibido con el equipo de medición durante la realización del proyecto.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] I. Boldea, "Electric generators and motors: An overview," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 3-14, 2020, doi: <https://doi.org/10.23919/TEMS.2017.7911104>
- [2] M. Rezamand, M. Kordestani, R. Cariveau, D. S. K. Ting, M. Orchard, M. Saif, "Critical Wind Turbine Components Prognostics: A Comprehensive Review," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 12, pp. 9306-9328, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3030165>
- [3] S. Choi, *et al.*, "Fault diagnosis techniques for permanent magnet AC machine and drives-A review of current state of the art," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 4, no. 2, pp. 444-463, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2819627>
- [4] G. Helbing, M. Ritter, "Deep Learning for fault detection in wind turbines," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, pp. 189-198, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.012>
- [5] H. Henao, *et al.*, "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 2, pp. 31-42, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/MIE.2013.2287651>
- [6] D. Basak, A. Tiwari, S. P. Das, "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A review," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, Mumbai, India, pp. 3061-3066, 2006, doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2006.372719>
- [7] Z. T. Mei, G. J. Li, Z. Q. Zhu, R. Clark, A. Thomas, Z. Azar, "Scaling Effect on Inter-Turn Short-Circuit of PM Machines for Wind Power Application," *2021 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2021*, Hartford, CT, USA, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/IEMDC47953.2021.9449606>
- [8] Z. Mei, G. J. Li, Z. Q. Zhu, R. Clark, A. Thomas, Z. Azar, "Scaling Effect On Inter-Turn Short-Circuit Fault of PM Machines for Wind Power Application," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 59, no. 1, pp. 789-800, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3211249>
- [9] Z. Nie, N. Schofield, "Condition monitoring of a permanent magnet synchronous generator for a wind turbine application," *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP684, pp. 1-6, 2016, doi: <https://doi.org/10.1049/cp.2016.0233>
- [10] S. Ferrari, G. Dilevrano, P. Ragazzo, P. Pescetto, G. Pellegrino, "Fast Determination of Transient Short-Circuit Current of PM Synchronous Machines Via Magnetostatic Flux Maps," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 59, no. 1, pp. 4000-4009, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3265952>
- [11] A. G. Olabi, *et al.*, "A review on failure modes of wind turbine components," *Energies*, vol. 14, no. 17, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14175241>
- [12] D. Wei, K. Liu, W. Hu, X. Peng, Y. Chen, R. Ding, "Short-Time Adaline Based Fault Feature Extraction for Inter-Turn Short Circuit Diagnosis of PMSM via Residual Insulation Monitoring," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 3, pp. 3103-3114, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3167164>
- [13] C. Verde, S. Gentil, R. Morales-Menéndez, *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos*, México: Trillas, 2011.
- [14] S. H. Kia, H. Henao, G. A. Capolino, "Efficient digital signal processing techniques for induction machines fault diagnosis," in *2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, Paris, France, 2013, pp. 232-246. doi: <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2013.6525183>
- [15] W. Yang, P. J. Tavner, M. Wilkinson, "Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine with a synchronous generator using wavelet transforms," *IET Conf. Publ.*, no. 538 CP, pp. 6-10, York, UK, 2008, doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20080473>
- [16] S. Halder, S. Bhat, C. Bhaumik, R. Rakshit, "Stator Inter-Turn Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motor," *Proc. 2020 IEEE 1st Int. Conf. Smart Technol. Power, Energy Control. STPEC*, Nagpur, India, 2020, pp. 3-8, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297677>
- [17] M. H. Toliyat, *et al.*, "Application of Pattern Recognition to Fault Diagnosis," in *Electric Machines Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, USA: Taylor and Francis Group, 2015.
- [18] I. H. Kao, W. J. Wang, Y. H. Lai, J. W. Perng, "Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Fault Diagnosis Based on Learning," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 2, pp. 310-324, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2847800>
- [19] P. Pietrzak, M. Wolkiewicz, T. Orlowska-Kowalska, "PMSM Stator Winding Fault Detection and Classification Based on Bispectrum Analysis and Convolutional Neural Network," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 5, pp. 5192-5202, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3189076>
- [20] W. Lee, G. Choi, "A Comprehensive Review of Fault-Tolerant AC Machine Drive Topologies: Inverter, Control, and Electric Machine," *2021 IEEE 13th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, SDEMPED*, Dallas, TX, USA, 2021, pp. 269-275, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/SDEMPED51010.2021.9605560>

- [21] A. Sengupta, “A First Course in Machine Learning by Simon Rogers and Mark Girolami,” *International Statistical Review*, vol. 82, no. 1. 2014. doi: https://doi.org/10.1111/insr.12051_21
- [22] V. M. Raschka, *Python Machine Learning*, 3rd ed., Birmingham UK: Packt Birmingham-Mumbai, 2019.
- [23] J. S. Walker, *A primer on wavelets and their scientific applications*, 2nd ed., UK: Taylor & Francis, 2008.
- [24] H. Cherif, A. Menacer, B. Bessam, R. Kechida, “Stator inter turns fault detection using discrete wavelet transform,” *Proc. IEEE 10th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives*, pp. 138-142, Guarda, Portugal, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2015.7303681>
- [25] C. Verde, S. Gentil, R. Morales-Menéndez, *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos*, México: Trillas, 2013.
- [26] R. A. Ortiz Medina, “Diagnóstico de Fallas Eléctricas en Estator de Máquinas Eléctricas de Aerogeneradores,” Tesis, Doctortado, Ciencias de la Ingeniería, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, 2021.

Cálculo de la impedancia de transformadores utilizando el Método de Elemento Finito

Transformer Impedance Calculation Using the Finite Element Method

Angel R. Hernández Santiago¹, Rodrigo Ocón Valdez², Mariana Vasquez Cañas³,
Leonardo A. Rico García⁴, Fermín P. Espino Cortés⁵

Arteche North America, MÉXICO

¹ORCID: 0009-0005-3686-9597 | rodrigo.hernandez@arteche.com

Universidad Nacional Autónoma de México, MÉXICO

²ORCID: 0000-0001-7525-1910 | rodrigocon99@aragon.unam.mx

Instituto Politécnico Nacional, MÉXICO

³ORCID: 0009-0007-8380-0562 | mvasquezc1800@alumno.ipn.mx

⁴ORCID: 0009-0000-0397-081X | lricog1800@alumno.ipn.mx

⁵ORCID: 0000-0003-4853-7563 | fespino@ipn.mx

Recibido 18/09/2024, aceptado 01/04/2025.

Resumen

Tanto el diseño como la construcción de transformadores de potencia son tareas complejas, debido a que son máquinas de gran capacidad y que deben proporcionar alta confiabilidad durante su operación dentro del sistema de potencia. Imprecisión en el cálculo de sus parámetros pueden ocasionar fallas inesperadas en la máquina y poner en riesgo el resto del sistema eléctrico. Por esta razón es de gran importancia que los parámetros de diseño del equipo cumplan de manera satisfactoria con las especificaciones particulares y normativas nacionales e internacionales aplicables. En el presente artículo se realiza el cálculo de la impedancia del transformador utilizando el método del elemento finito (MEF) en tres tipos de transformadores: Un transformador de potencia tipo columna monofásico, un transformador de distribución trifásico tipo acorazado, y un transformador monofásico de servicios propios. Se comparan los resultados obtenidos con el MEF contra los obtenidos mediante fórmulas analíticas tradicionales; las cuales arrojan resultados imprecisos para el caso de diseños especiales y con geometrías complejas. Finalmente, los valores calculados son validados con los resultados de las mediciones experimentales realizadas en laboratorio. Se concluye que el Método de Elemento Finito es adecuado para calcular con precisión la impedancia de diferentes tipos de transformadores, especialmente cuando sus geometrías internas son complejas

Palabras clave: impedancia del transformador, método de elemento finito, ensayo de corto circuito, impedancia de dispersión.

Abstract

The design and construction of power transformers are complex tasks because they are high-capacity machines and must provide high reliability during their operation within the power system. Inaccuracy in calculating its parameters can cause unexpected failures in the machine and put the rest of the electrical system at risk. For this reason, it is of great importance that the design parameters of the equipment satisfactorily comply with the particular specifications and applicable national and international standards. In this paper, the calculation of the transformer impedance is conducted using the finite element method (FEM) in three types of transformers: A single-phase core-type power transformer, a three-phase shell-type distribution transformer, and a single-phase self-service transformer. The results obtained with the FEM are compared against those obtained through traditional analytical formulas; which give imprecise results in the case of special designs and complex geometries. Finally, the calculated values are validated with the results of experimental measurements carried out in the laboratory. It is concluded that the Finite Element Method is suitable for accurately calculating the impedance of distinct types of transformers, especially when their internal geometries are complex.

Index terms: transformer impedance, finite element method, short circuit test, leakage impedance.

I. INTRODUCCIÓN

Los transformadores son elementos indispensables en los sistemas eléctricos de potencia, ya que son utilizados para variar la tensión a los diferentes niveles requeridos en las redes de transmisión y distribución. Su correcto diseño y construcción es fundamental para asegurar su buen desempeño y también reducir la posibilidad de que salga de operación por una falla.

El diseño del transformador debe satisfacer las demandas del cliente y garantizar que la construcción de éste sea con valores cercanos a los especificados. Uno de los parámetros de garantía más importantes con los que debe cumplir el diseño de un transformador es el de su impedancia serie, denominada también como impedancia de dispersión o impedancia de corto circuito del transformador.

La impedancia de un transformador es un parámetro que se define desde el inicio del proceso de diseño y tiene un impacto directo en el costo total del equipo, al ser función directa de las dimensiones y geometría de los devanados. Además de que impacta de manera directa en el comportamiento del sistema eléctrico en el que se encuentra; pues, por un lado, se requiere que tenga un valor elevado para que sea capaz de limitar las corrientes de cortocircuito a un nivel razonable y, por el contrario, que sea de un valor razonablemente bajo para mantener la regulación de tensión en un valor aceptable. La impedancia también es un parámetro indicador de la eficiencia del equipo, pues mientras más elevado sea su valor, mayores serán las pérdidas con carga, debido a los mayores flujos magnéticos dispersos internos [1].

Es posible establecer experimentalmente los valores de impedancia y pérdidas en el núcleo de un transformador una vez que éste es construido. Estos parámetros característicos se pueden obtener mediante dos ensayos al transformador: el ensayo de circuito abierto y el ensayo de cortocircuito; sin embargo, durante la etapa de diseño, los fabricantes siempre realizan un cálculo previo de los parámetros del transformador mediante fórmulas tradicionales [13]. Las fórmulas tradicionales no son aplicables en ciertos tipos de diseño y, de utilizarse para una primera aproximación, pueden arrojar valores que no son cercanos a los reales ya medidos en el equipo. En el presente artículo se realiza el cálculo de la impedancia utilizando el método del elemento finito en tres tipos de transformadores: Un transformador de potencia tipo columna monofásico, un transformador de distribución trifásico tipo acorazado, y un transformador monofásico de servicios propios. Los resultados obtenidos con el MEF son comparados contra los obtenidos mediante fórmulas analíticas tradicionales; las cuales arrojan resultados imprecisos para el caso de diseños especiales y con geometrías complejas. Los valores calculados son validados con los resultados de las mediciones experimentales realizadas durante los ensayos de laboratorio realizadas en fábrica.

La aportación principal del trabajo se centra en evaluar el alcance y la precisión obtenida con el uso de las fórmulas analíticas tradicionales para el cálculo de la impedancia en distintos tipos de diseños comerciales, y demostrar que el método del elemento finito es una alternativa viable y eficiente para realizar el cálculo de impedancia en diseños convencionales y no convencionales, en donde las geometrías de las bobinas son complejas y las formulaciones analíticas resultan imprecisas.

II. CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR

La impedancia del transformador está constituida por una componente resistiva y una componente reactiva, la componente resistiva representa las pérdidas con carga (I^2R) y la componente reactiva al flujo magnético de dispersión de los devanados. El conocimiento de la impedancia del transformador es importante al resolver distintos casos de estudio de circuitos y sistemas en donde es conveniente expresar las cantidades en una base por unidad. La impedancia en por ciento del transformador se define como se muestra en la ecuación (1) [1], [2], [3], [13]:

$$\%Z = \sqrt{(\%R)^2 + (\%X)^2} \quad (1)$$

donde:

%Z = Porcentaje de impedancia

%R = Porcentaje de resistencia

%X = Porcentaje de reactancia de dispersión

A continuación, se describe el cálculo de cada una de estas componentes de la impedancia mediante fórmulas tradicionales y mediante el ensayo de corto circuito.

A. Cálculo de la componente resistiva de impedancia del transformador

Conociendo el valor de la resistencia eléctrica en los conductores de los devanados se puede calcular el valor de las pérdidas por efecto Joule y con este valor calcular el porcentaje de resistencia con la ecuación (2) [1]:

$$\%R = \frac{P_{cc}}{10 \times kVA} \quad (2)$$

donde:

P_{cc} = Pérdidas por fase por efecto Joule presentes en los devanados de A.T. y B.T. [W]

kVA = Capacidad del transformador por fase [kVA]

Normalmente la resistencia del transformador se corrige a la temperatura de operación del equipo.

B. Cálculo de la reactancia de dispersión por fórmula tradicional

Para el cálculo de la reactancia de dispersión, para transformadores con bobinas concéntricas se tiene la ecuación empírica (3) [1]:

$$\%X = \frac{\left(\frac{kVA}{f_{ase}}\right) \left(\frac{f}{60}\right) V_m \gamma}{22.14 \alpha N_{ab} Vt^2} \quad (3)$$

donde:

f = frecuencia [Hz]

Vt = Volts por vuelta

N_{ab} = Número de espacios entre alta - baja

V_m = Promedio de las longitudes de las vueltas medias de B.T. y A.T.

kVA/f_{ase} = Capacidad por fase del transformador en kVA.

Para incluir en el cálculo el recorrido del flujo de dispersión en el transformador, se calculan las siguientes constantes con las ecuaciones (4) y (5) [1]:

$$\gamma = ((a + c)/3) + b \quad (4)$$

$$\alpha = (a + b + c)/3 + (h + l)/2 \quad (5)$$

donde:

a: Espesor promedio del devanado de baja tensión [mm]

b: Espesor promedio del espacio entre el devanado de baja y alta tensión [mm]

c: Espesor promedio del devanado de alta tensión [mm]

h: Altura del devanado de baja tensión [mm]

l: Altura del devanado de alta tensión [mm]

C. Cálculo de la impedancia del transformador por medio del ensayo de corto circuito

El ensayo de cortocircuito se basa en la Norma Mexicana NMX-J-169-ANCE-2015 y en la norma internacional IEEE Std. C57.12.90-2021 con el objeto de establecer especificaciones, parámetros y métodos para el ensayo.

A partir de realizar mediciones en el ensayo de cortocircuito, es posible determinar los valores de los datos que conforman el circuito equivalente del transformador. Además, el ensayo tiene como finalidad comprobar que los valores obtenidos en las mediciones están de acuerdo con las especificaciones y normativas requeridas.

- 4 El ensayo consiste en cortocircuitar el devanado secundario e ir aplicando progresivamente una tensión primaria (tensión de impedancia V_{CC}) hasta alcanzar la circulación de la corriente nominal (I_{CC}) teniendo el devanado secundario cortocircuitado [4].

La tensión de impedancia está definida por una componente resistiva, relacionada con las pérdidas debido a la carga y una componente reactiva relacionada al flujo disperso inducido en los devanados debido a la caída en la reactancia de dispersión.

Como se observa en el circuito de la Fig. 1, para el caso de un transformador monofásico, se colocan los siguientes aparatos de medición: Ampérmetro, Voltmetro y Wáttmetro, con el fin de medir y registrar los siguientes parámetros: la tensión V_{CC} ; la corriente I_{CC} y la potencia de corto circuito (P_{CC}) [4].

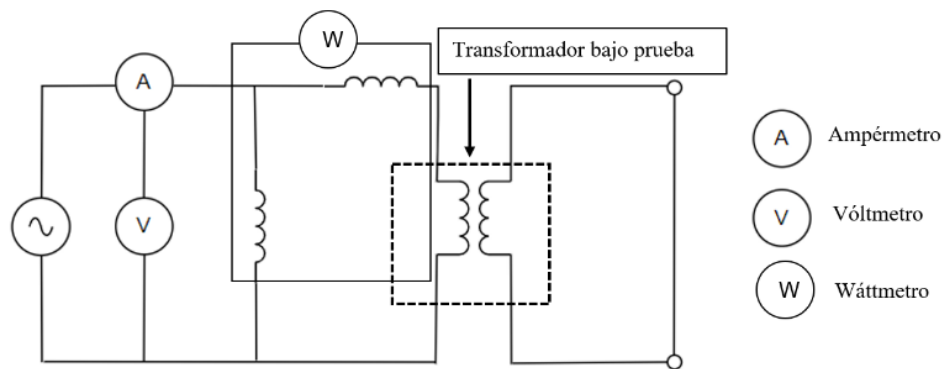


Fig. 1. Diagrama de conexión para el ensayo de cortocircuito en un transformador monofásico [4].

La tensión de entrada aplicada en el ensayo es de un valor tan bajo que la corriente en la rama de excitación se puede despreciar, en tal caso, si se anula la corriente de excitación la caída de tensión total corresponde a la impedancia del transformador. Por lo que, a partir de los valores obtenidos en las mediciones realizadas, se calcula la impedancia del transformador referida al lado primario, como se muestra en el siguiente desarrollo [4], [13]:

El factor de potencia queda definido como se muestra en la ecuación (6):

$$F.P. = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} \quad (6)$$

Al estar en retraso, el ángulo de la corriente es negativo y el ángulo de la impedancia da un valor positivo que se calcula con la expresión 7:

$$\theta = \cos^{-1}(F.P.) \quad (7)$$

Que junto con la tensión y corriente permiten calcular la impedancia del transformador o de cortocircuito mediante la expresión (8):

$$Z_{CC} = \frac{V_{CC} \angle 0^\circ}{I_{CC} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \theta^\circ \quad (8)$$

La forma rectangular de la impedancia del transformador es igual a la expresión (9):

5

$$Z_{CC} = R_{CC} + jX_{CC} \quad (9)$$

donde:

V_{CC} = Tensión de entrada [V]

I_{CC} = Corriente de entrada [A]

P_{CC} = Potencia de entrada [W]

Z_{CC} = Impedancia del transformador [Ω]

R_{CC} = Parte resistiva de impedancia del transformador [Ω]

X = Reactancia de dispersión del transformador [Ω]

Finalmente, para el cálculo de la impedancia en por ciento, como se suele especificar, se divide la impedancia obtenida en forma polar entre la impedancia base, como se muestra en la siguiente expresión (10) [4]:

$$\%Z = (Z_{CC} \text{ en forma polar sin ángulo}) (100) / (Z_{Base A.T.}) \quad (10)$$

donde la impedancia base se calcula con la expresión (11):

$$Z_{Base A.T.} = (Tensión \text{ en el devanado primario})^2 / (Capacidad \text{ en kVA}) \quad (11)$$

Para el caso de transformadores trifásicos, distintas opciones para el circuito de medición y procedimiento del cálculo de la impedancia del transformador pueden ser consultadas en [5].

D. Cálculo de la impedancia del transformador por medio del método del elemento finito

Utilizando el paquete comercial COMSOL® Multiphysics, basado en el método del elemento finito, se calcula el valor de la impedancia reproduciendo el ensayo de cortocircuito en el modelo del transformador. Para esta simulación, se cortocircuita el devanado de secundario y se le suministra el valor de la corriente nominal al primario. Se obtiene la tensión en las terminales del primario, y conocido el valor de la corriente nominal, se realiza el cálculo de la impedancia. El diagrama de flujo de la Fig. 2 muestra de manera resumida el procedimiento a seguir para el cálculo de la impedancia del transformador mediante el uso de COMSOL.

El problema se resuelve como un fenómeno electromagnético cuasi estacionario a frecuencia del sistema (60 Hz), utilizando la interfaz de Campos Magnéticos en el dominio de la frecuencia de COMSOL, donde las ecuaciones a resolver mediante el método del elemento finito son:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (13)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (14)$$

$$\mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \quad (15)$$

donde:

ω : Frecuencia angular [rad/s]

σ : conductividad [S/m]

$\mathbf{H}$: Intensidad de campo magnético [A/m]

$\mathbf{J}$: Densidad de corriente [A/m²]

$\mathbf{B}$: Densidad de flujo magnético [T]

$\mathbf{E}$: Intensidad de campo eléctrico [V/m]

$\mathbf{A}$: Potencial vectorial magnético [Wb/m]

6

En la interfaz de campos magnéticos y eléctricos de la versión de COMSOL utilizada en este trabajo se cuenta con la herramienta COIL o BOBINA, la cual permite simplificar la configuración de modelos electromagnéticos de bobinas y conductores de baja frecuencia. Para las simulaciones en este trabajo, el campo magnético es generado por corrientes eléctricas que fluyen en materiales conductores por lo que esta herramienta es adecuada para definir el modelo de los devanados de manera fácil y para diferentes estructuras, permitiendo traducir cantidades distribuidas (densidades de corriente y campos eléctricos) en cantidades concentradas (corrientes y tensiones).

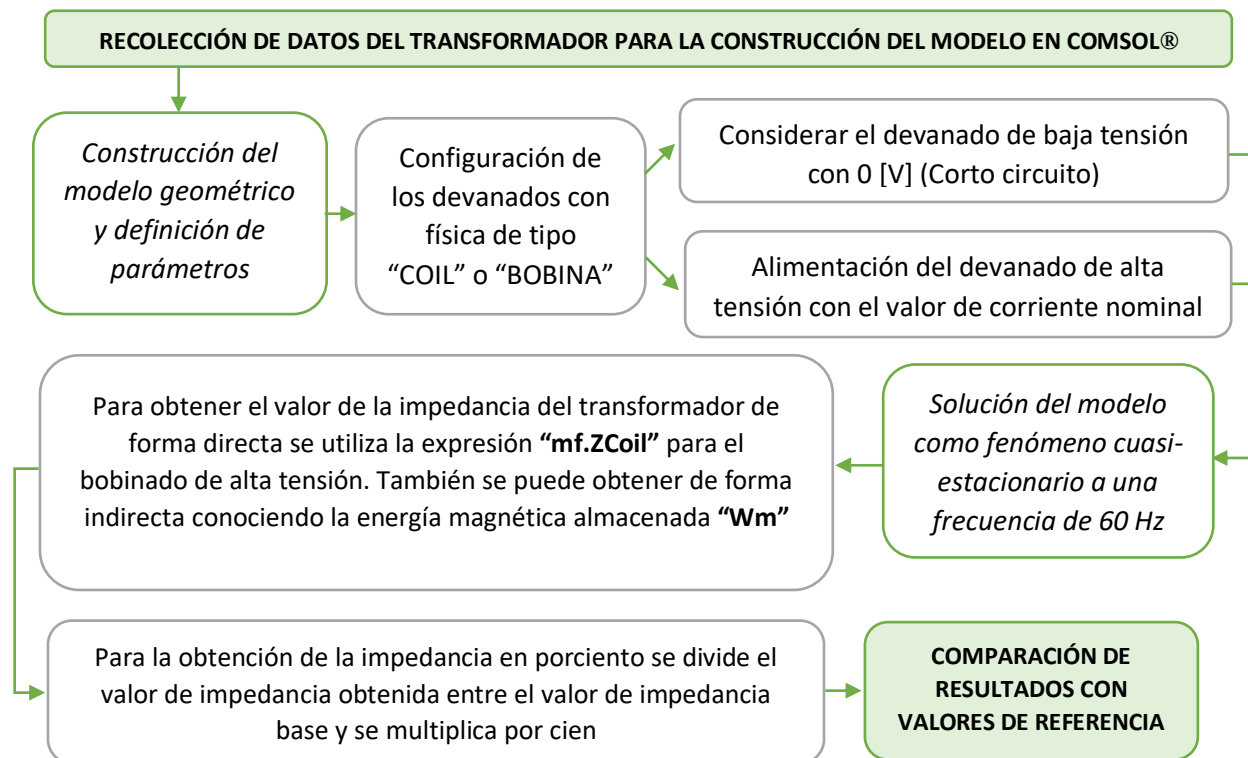


Fig. 2. Diagrama de flujo de los pasos de la metodología empleada para el cálculo de la impedancia del transformador mediante COMSOL.

Dependiendo de la geometría del núcleo y devanados del transformador, cuando existe simetría axial de núcleo y devanados, se tienen dos opciones para simular el problema: como una geometría axial-simétrica en 2D y como una geometría en 3D. En el caso de 3D, también es útil considerar cualquier plano de simetría para reducir el modelo geométrico y así disminuir los recursos computacionales necesarios para resolver el problema.

III. CASOS DE APLICACIÓN

A continuación, se obtiene el valor de la impedancia de tres tipos de transformador empleando la fórmula 1, 2 y 3, y mediante un modelo resuelto por medio del método del elemento finito. Para el caso del transformador monofásico de potencia se corroborará la exactitud del resultado obtenido del ensayo de corto circuito de acuerdo con la norma NMX – J – 284 – ANCE – 2018 [6]. La norma establece que la impedancia del transformador medida debe tener una diferencia máxima de hasta $\pm 7.5\%$ del valor requerido por el cliente. Lo anterior se verifica para dos de los casos analizados, en el caso del transformador de distribución no se realizó el ensayo de corto circuito en laboratorio.

7

A. Caso 1: Transformador monofásico de potencia

El transformador de potencia de este caso es de tipo columnas, clase ONAN/ONAF/ONAF y correspondientes potencias de 27.333/36/45.33 MVA, monofásico, 60 Hz, 65°C, devanado de A.T de 230 kV/ $\sqrt{3}$ ± 9 (1.25%); devanado de B.T de 34.5 kV, con conexión en banco estrella – delta. En la Fig.3 se muestra este transformador.



Fig. 3. Transformador de potencia monofásico del Caso 1.

El transformador cuenta con dos piernas en las cuales se encuentra un devanado de alta tensión y un devanado de baja tensión por cada una de éstas, en la Fig.4 se muestra el esquema en 2D del arreglo que tiene cada pierna.

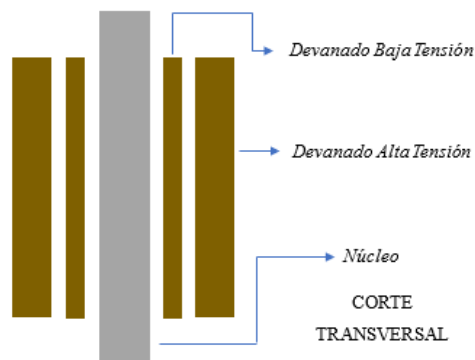


Fig. 4. Arreglo de los devanados de alta y baja tensión.

Las bobinas de alta tensión se componen de dos partes en paralelo por cada pierna y a su vez se conectan en paralelo ambas piernas, véase Fig. 5, cada vuelta está formada por 2 soleras rectangulares de cobre.

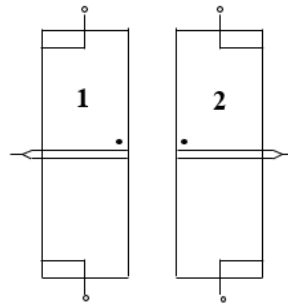


Fig. 5. Arreglo en paralelo de las bobinas de alta tensión en las dos piernas.

Para el caso de las bobinas de baja tensión se tiene una bobina por pierna y ambas se conectan en serie entre sí, como se muestra en la Fig. 6. Cada vuelta está formada por 38 soleras rectangulares de cobre

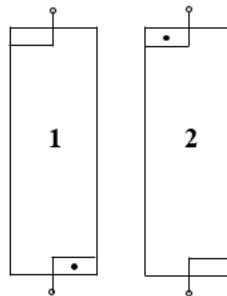


Fig. 6. Arreglo en serie de las bobinas de baja tensión en las dos piernas.

La parte activa (núcleo y devanados) del transformador monofásico de potencia se muestra en la Fig. 7a, en la Fig. 7b se presenta el modelo tridimensional del mismo. La distribución de densidad de flujo magnético durante la simulación del ensayo de corto circuito se presenta en la Fig. 8(a) para el modelo considerando una geometría 2D axialsimétrica y en la Fig. 8(b) para el modelo en 3D. Los resultados obtenidos para la impedancia del transformador mediante las fórmulas tradicionales, mediante el método del elemento finito (en 2D y 3D) así como los resultados obtenidos en el ensayo de cortocircuito se presentan en la Tabla 1.

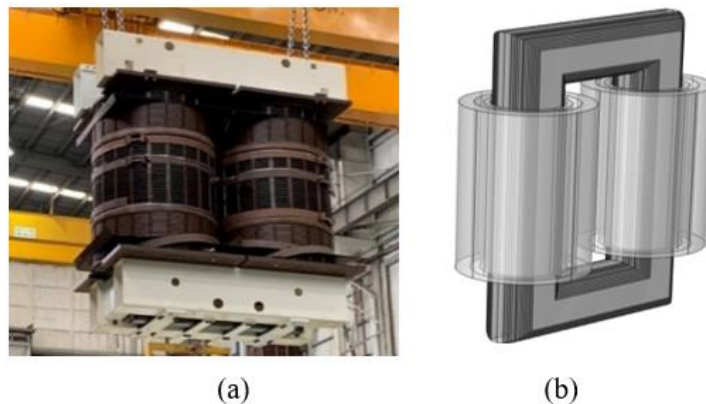
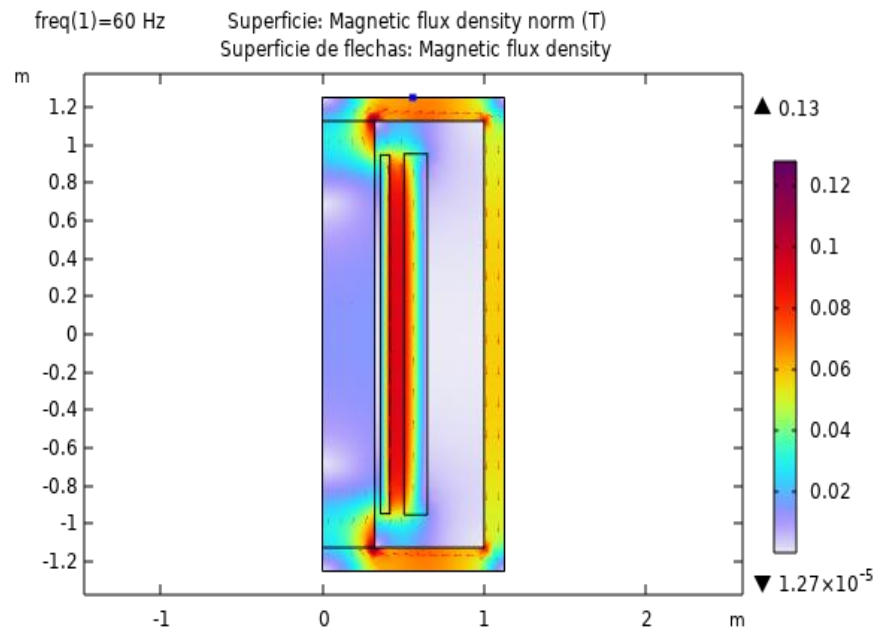


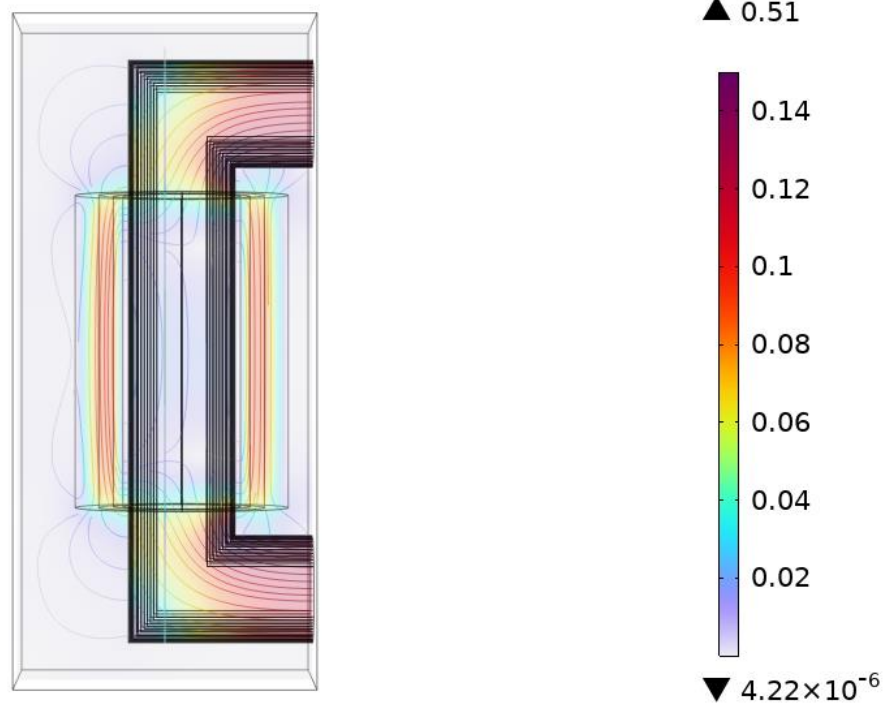
Fig. 7. Transformador de potencia monofásico. (a) Construcción del transformador, (b) modelo tridimensional en COMSOL.

9



(a)

Densidad de Flujo Magnético [T]



(b)

Fig. 8. Resultados de la distribución de la densidad de flujo magnético durante la simulación del ensayo de corto circuito. (a) Modelo del transformador monofásico de potencia en 2D axialsimétrico, (b) Modelo del transformador monofásico de potencia en 3D.

TABLA 1
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL PORCIENTO DE IMPEDANCIA.
CASO 1: TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE POTENCIA.

Método de cálculo	Porcentaje de impedancia (%)	Diferencia respecto al valor real (%)	Diferencia respecto al valor requerido (%)
Simulación 2D	7.82	0.85	2.25
Simulación 3D	7.80	1.80	2.5
Fórmula analítica tradicional	7.71	2.20	3.6
- El valor real es obtenido en laboratorio durante el ensayo de cortocircuito: 7.89% - El valor de impedancia requerido por el cliente: 8% - Diferencia entre el valor medido y el requerido: 1.37%			

Como se puede ver en la Tabla 1, el resultado del cálculo con fórmulas tradicionales presenta mayor diferencia que los calculados con el MEF respecto a el valor medido y al valor requerido. El valor medido difiere solo 1.37% respecto al valor requerido, porcentaje considerablemente menor al 7.5% especificado como diferencia máxima en estándares.

B. Caso 2: Transformador trifásico de distribución.

El transformador de distribución de este caso es el que se presenta en [1], en la Fig. 9 se presenta un transformador de este tipo. Las especificaciones son: transformador trifásico tipo poste de 75kVA, 13200/220-127V, 60Hz, 65°C y conexión Δ -Y.



Fig. 9. Transformador trifásico de distribución tipo poste del Caso 2. (vista exterior y conjunto núcleo-bobinas).

La Fig. 10 muestra el resultado de distribución de densidad de flujo magnético obtenido con el MEF durante la simulación del ensayo de corto circuito.

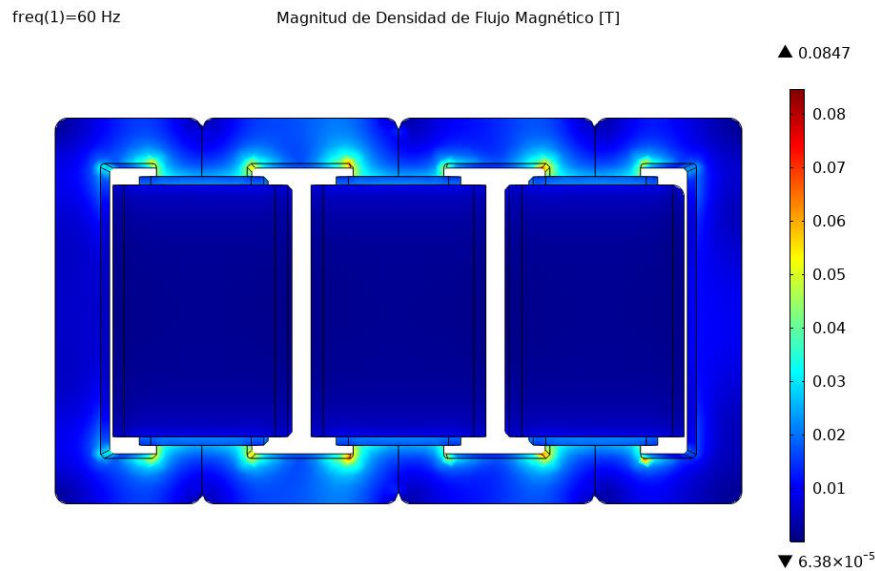


Fig. 10. Resultados de la distribución de densidad de flujo magnético en el transformador de distribución durante el ensayo de corto circuito.

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos para la impedancia del transformador mediante las fórmulas tradicionales y mediante el método del elemento finito (3D). En este diseño no es posible utilizar una geometría en 2D por la forma rectangular del núcleo y devanados del transformador. En este caso no fue posible contar con los resultados del ensayo de cortocircuito. Mientras que el valor de referencia es el límite inferior del 2% especificado por norma [1].

TABLA 2
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE IMPEDANCIA
CASO 2: TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE DISTRIBUCIÓN.

Método de cálculo	Porcentaje de impedancia (%)			Diferencia respecto al valor recomendado (%)
	Fase A	Fase B	Fase C	
Simulación 3D en COMSOL® Multiphysics	2.03	2.02	2.02	1.5
Fórmula analítica tradicional		1.96		2
Valor límite recomendado por norma: 2 a 3% (se considera en este caso el 2%)				

Como se puede ver en la Tabla 2, si se considera como referencia el valor límite inferior recomendado del 2% de impedancia, el cálculo por el MEF presenta una diferencia menor con respecto al valor calculado por fórmulas tradicionales.

C. Caso 3. Transformador de servicios propios.

Los transformadores de servicios propios son aquellos cuyo primario se conecta a la fase de una línea de alta tensión proporcionando energía a una tensión secundaria reducida, menor o igual a 480 V, hasta una potencia nominal de 300 kVA. Su principal función es alimentar los servicios propios de subestaciones eléctricas o suministrar energía en baja tensión para la distribución de carga rural [7]. En la Fig. 11 se muestra un transformador de servicios propios.



Fig. 11. Transformador de servicios propios del Caso 3 [12].

El transformador bajo estudio corresponde a un equipo clase ONAN, 25 kVA, 1Ø, 60 Hz, 65°C, 1000 m.s.n.m, A.T. 138 kV / $\sqrt{3}$; B.T. 240 V / 120 V – 120 V. El diseño considera un núcleo tipo acorazado en donde los devanados de alta y baja tensión se encuentran localizados en la pierna central teniendo una configuración como se muestra en la Fig. 12.

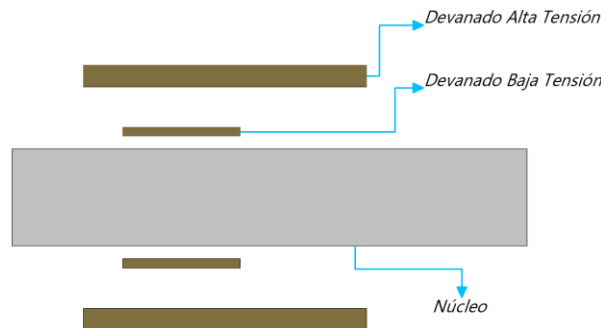


Fig. 12. Arreglo de los devanados de alta y baja tensión.

El devanado de alta tensión está dividido en una serie de discos conectados en serie para distribuir el potencial eléctrico de forma gradual, mientras que el devanado de baja tensión está conformado por dos secundarios tipo helicoidales en forma concéntrica que pueden conectarse en serie, en paralelo o disponer de voltajes independientes de 120 V.

El modelo de simulación consideró cada disco del devanado primario con sus respectivas vueltas, el devanado secundario se consideró separado en los dos devanados, como se muestra en la Fig. 13. En la Fig. 14 se presenta la distribución de la densidad de flujo durante el ensayo de cortocircuito. Aprovechando la simetría de la

geometría, solo se resolvió la mitad del modelo. Los resultados del cálculo de la impedancia por medio de fórmulas tradicionales y con el método del elemento finito (en 2 y 3 dimensiones) se presentan en la Tabla 3. Al comparar estos resultados con el obtenido con el ensayo de cortocircuito, es claro que el cálculo con fórmulas tradicionales no cumple con la diferencia máxima recomendada, pues la diferencia es del 15.21%. Los valores con el MEF en 2D y 3D presentan una diferencia considerablemente menor respecto al medido.

Se considera que la diferencia tan grande que se tiene entre el valor medido y el valor calculado por la fórmula tradicional se debe a dos causas, la diferencia considerable entre devanados de alta y baja en cuanto altura del devanado, y el que los devanados no estén centrados uno respecto al otro sobre la pierna del núcleo. El efecto de lo anterior se puede ver en la distribución del campo magnético en los extremos del devanado de baja tensión que se muestra en la Fig. 15, la componente radial del flujo disperso entre devanados se incrementa en esta sección, la fórmula analítica utilizada para el cálculo de la reactancia de dispersión (X) solo considera la existencia de la componente axial del flujo.

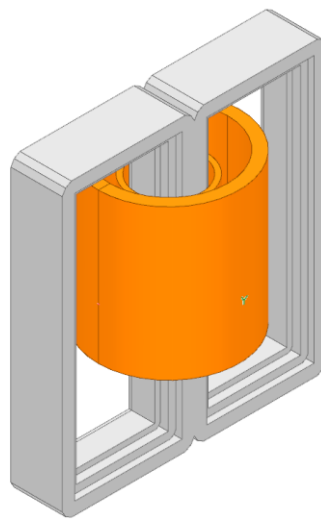


Fig. 13. Modelo 3D simplificado para análisis.

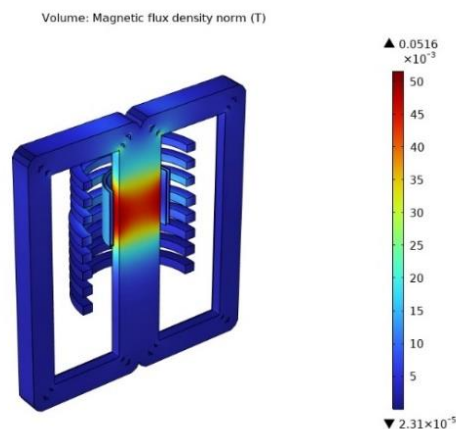


Fig. 14. Distribución de la densidad de flujo durante el ensayo de cortocircuito.

TABLA 3
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL PORCIENTO DE IMPEDANCIA
CASO 3: TRANSFORMADOR DE SERVICIOS PROPIOS

Método de cálculo	Porciento de impedancia (%)	Diferencia respecto al valor requerido %
Simulación 2D	3.5280	-3.34
Simulación 3D	3.5095	-2.83
Fórmula analítica tradicional	2.8914	15.21
El valor real es obtenido en laboratorio durante el ensayo de cortocircuito 3.41%		
El valor requerido por el cliente es solo especificado como menor al 12%		

14

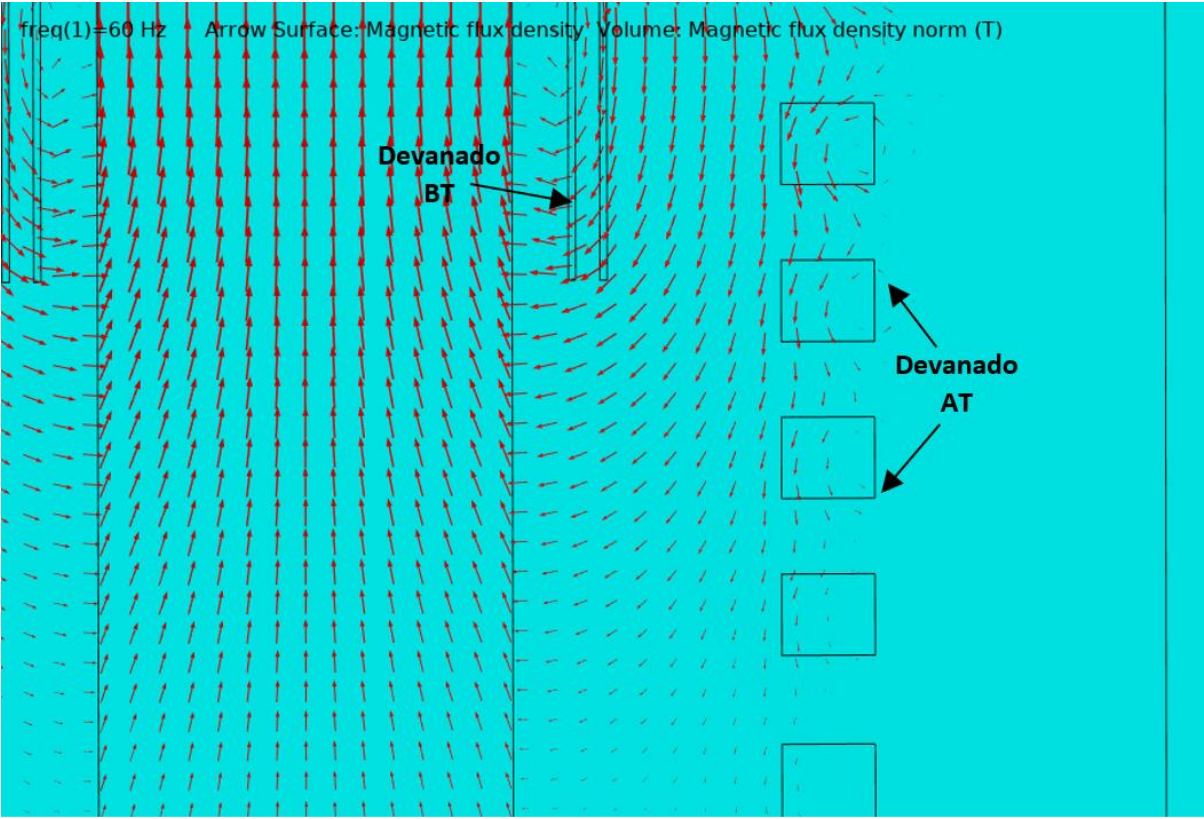


Fig. 15. Comportamiento del campo magnético en el extremo del devanado de baja tensión (BT).

IV. CONCLUSIONES

Respecto a los diseños del transformador de potencia monofásico y el transformador trifásico de distribución, los valores calculados para de la impedancia usando las fórmulas tradicionales y el cálculo con el MEF arrojan valores similares y satisfactorios respecto a los valores reales, medidos en laboratorio durante el ensayo de corto circuito; aunque se resalta el hecho de que el MEF ofrece mayor precisión en el cálculo respecto a los valores medidos.

15

Para el caso del transformador de servicios propios la diferencia de las fórmulas tradicionales con respecto al valor real obtenido en el ensayo de corto circuito no es aceptable; pues alcanza una diferencia del 15%. En este tipo de diseños donde los devanados tienen variaciones significativas respecto a las geometrías típicas (geometrías complejas), el cálculo por el MEF resulta ser la mejor opción al comparar contra los valores medidos en laboratorio.

Después de analizar diferentes tipos de diseños comerciales, se concluye que el cálculo de impedancia con el método de elemento finito es adecuado para calcular con precisión la impedancia serie del transformador, especialmente cuando sus geometrías internas son complejas. En casos donde las geometrías son convencionales es posible la aplicación de formulaciones analíticas, pero considerando que la precisión del cálculo alcanzada es menor que con el uso de MEF.

Para el caso de diseños de transformadores especiales con reconexiones internas y operación a diferentes niveles de tensión (reconectables), el cálculo preciso de la impedancia es fundamental para garantizar la correcta calibración y operación de los esquemas de protección. Aquí, el MEF nuevamente se plantea como una opción para realizar cálculos precisos y este tema se tratará en un proyecto derivado del presente trabajo y que será documentado en futuras publicaciones.

CRedit (*Contributor Roles Taxonomy*)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: ARHS, ROV; Metodología: ROV, FPEC; Software: ARHS, FPEC; Investigación: MVC, LARG; Redacción y preparación del borrador original: MVC, LARG; Redacción, revisión y edición: ROV, FPEC; Supervisión: FPEC; Análisis formal: ARHS, ROV; Administración del proyecto: FPEC; Adquisición de fondos: FPEC.

Financiamiento: Los autores declaran que parte del proyecto se financió gracias a los proyectos SIP 20230566 y 20240900

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al IPN y SIP por los apoyos otorgados

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] P. Avelino Pérez, *Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas*, México: Reverté, 3ª ed., 2020.
- [2] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, *Transformer engineering: design, technology, and diagnostics*, USA: CRC press, 2a ed., 2017.
- [3] F. Zhu, B. Yang, *Power Transformer Design Practices*, USA: CRC Press, 2021.
- [4] Asociación de Normalización y Certificación A.C., *PROY-NMX-J-169-ANCE-2015, Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia – Métodos de Prueba*. Industria Eléctrica, 2017. Available: <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-j-169-ance-2015/>
- [5] A. Carlson, et al., *Testing of Power Transformers, Routine tests, Type tests and Special tests*, Canada: ABB, 2003.
- [6] Asociación de Normalización y Certificación A.C., *NMX-J-284-ANCE-2018, Transformadores y autotransformadores de potencia-Especificaciones (Cancela a la NMX-J-284-ANCE-2012)*. Industria Eléctrica, 2018. Available: https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/7518/seeco3a15_C/seeco3a15_C.html

- [7] Comisión Federal de Electricidad, *Transformadores Reductores para Servicios Propios y Auxiliares, Especificación CFE K0000-26*, 2012.
- [8] I. L. Kosow, *Electric Machinery and Transformers*, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1972.
- [9] J. J. Winders, *Power Transformers Principles and Applications*, USA: CRC Press, 2019.
- [10] R. M. Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, *Transformer Design Principles*, USA: CRC Press, 2018.
- [11] V. M. Jimenez, V. J. Fernández, J. C. Olivares, R. Ocón, "Short-Circuit Impedance Calculation of 25 MVA Autotransformer with Tertiary Winding using FEM," *IEEE Latin American Transactions*, vol. 21, no. 3, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10068838>
- [12] Artech North America, *Serie UTP - Transformadores de Tensión para Servicios*, 2025, (05 de marzo). Serie UTP - Transformadores de Tensión para Servicios Auxiliares.
- [13] A. R. Hernández Santiago, E. Ramírez Cazarez, "Station Service Voltage Transformer Impedance Calculation Using the Finite Element Method Compared with Measurements," *2024 9th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Colmar, France, 2024, pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/IYCE60333.2024.10634948>

Aplicación de un algoritmo evolutivo en el estudio del contenido de actínidos menores en celdas de combustible de un reactor de agua en ebullición

An application of an evolutionary algorithm in the study of a boiling water reactor fuel lattices with minor actinides

José Luis Montes Tadeo¹, Eduardo Martínez Caballero², José Ramón Ramírez Sánchez³

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Sistemas Nucleares, Estado de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0000-0001-5892-5207 | joseluis.montes@inin.gob.mx

² ORCID: 0000-0003-1790-2521 | eduardo.martinez@inin.gob.mx

³ ORCID: 0000-0002-9203-0834 | ramon.ramirez@inin.gob.mx

Recibido 07/02/2025, aceptado 10/04/2025.

Resumen

En este trabajo, se presenta un método para diseñar neutrónicamente celdas de combustible para un reactor de agua en ebullición. Los diseños generados incluyen un vector de actínidos menores que se incorporan en alguna de las posiciones de un arreglo típico de 10×10 varillas del combustible. Este vector se forma por concentraciones de neptunio, americio y curio. Las variables de decisión para el problema de diseño de este tipo de celdas fueron el enriquecimiento promedio en U-235 (w/o), la concentración de trióxido de gadolinio Gd₂O₃ (w/o), el factor de multiplicación neutrónica en un medio infinito (k-infinito) y el factor de pico de potencia local de la celda de combustible. Además, se asumen como condiciones de búsqueda una fracción de vacíos (%) fija, la ausencia de barra de control, y la temperatura del combustible, entre otras. Las restricciones consideradas sobre las variables de decisión establecieron que el factor de multiplicación de neutrones en un medio infinito (k-infinito) debía estar dentro del intervalo de ±100 pcm con respecto al valor de referencia; el enriquecimiento promedio de la celda debe estar por debajo del valor de referencia en no más de 1% con respecto al valor de la celda de referencia; una condición similar se asume para la concentración de veneno neutrónico quemable, éste debe estar dentro del intervalo definido por ± 1.0% respecto del valor de referencia; el factor de pico local de potencia no debe ser más grande que el valor de referencia asumido. Se utiliza el código CASMO4 para la simulación de las celdas de combustible durante el proceso de diseño. Las celdas generadas satisfacen cada una de las restricciones de diseño aplicadas en esta aproximación de solución al problema de diseño de celdas de combustible, cuando algunas de sus posiciones dentro del arreglo incluyen de manera selectiva concentraciones de actínidos menores.

Palabras clave: Actínidos menores, celda de combustible, CASMO4.

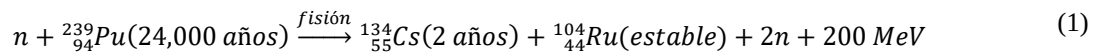
Abstract

In this work, a method for carrying out the neutronic design of a boiling water reactor fuel lattices is shown. Generated designs include a vector of minor actinides that was added in one of the positions of a typical 10×10 fuel assembly. This vector is composed of neptunium, americium and curium concentrations. The decision variables used in this design process were the average enrichment of U-235 (w/o), the concentration of tri-oxide of gadolinium Gd₂O₃ (w/o), neutronic multiplication factor in an infinite medium (k-infinity), and the local power peaking factor of the fuel lattice. In addition to, a fixed average void fraction (%), not presence of control rod, and the temperature of fuel, among other are assumed as search conditions. The considered restrictions on decision variables, established that k-infinity must be into the interval of ±100 pcm with respect to reference value; the average enrichment of fuel lattice must be under the reference fuel enrichment but not less than 1.0% with respect to the reference lattice; a similar restriction is also assumed for neutronic burnable poison concentration, it must be inside the range defined by ± 1.0% around reference value; local power peaking factor must not be greater than assumed reference. CASMO4 code was used for carrying out the simulation of fuel lattices through the designing process. Obtained fuel lattices fulfilled each one of the restrictions applied in this solution approach to fuel lattice design problem, when some of positions inside the array may selectively include concentrations of minor actinides.

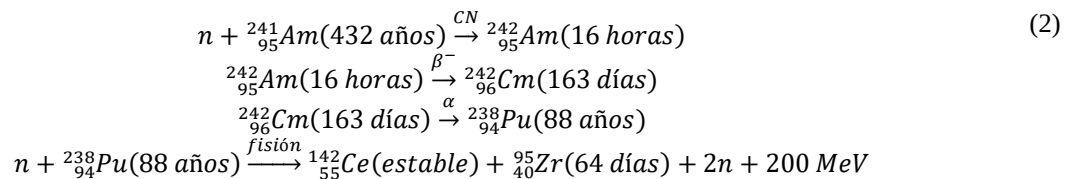
Index terms: Minor actinides, fuel lattice, CASMO4.

I. INTRODUCCIÓN

Los actínidos resultantes de utilizar el dióxido de uranio (UO₂) como combustible para los reactores nucleares de potencia están conformados por el Plutonio (Pu), Neptunio (Np), Americio (Am), Curio (Cm) y otros actínidos transuránicos. Estos constituyen el grupo de residuos que ofrece mayores dificultades de gestión, ya que son materiales altamente radiactivos y pueden tener interés proliferante para la fabricación de armas. Además, generan importantes cantidades de calor por radiactividad y se mantienen activos por períodos muy largos de tiempo, desde miles hasta cientos de miles de años. La gestión de los actínidos menores (como el Np, Am y Cm) es uno de los puntos fundamentales que deben ser analizados. Con el fin de disminuir considerablemente el inventario de actínidos menores del combustible nuclear gastado, se debe considerar el reciclado de estos, con el objetivo de transmutarlos por medio de la fisión o captura neutrónica a isótopos estables, o con vidas medias más cortas. El proceso fundamental para realizar la transmutación de elementos transuránicos es la fisión inducida por neutrones. Tras absorber un neutrón, un núcleo de gran masa atómica se divide en dos núcleos más pequeños generando nuevos neutrones y liberando energía (~200 MeV). Este proceso puede transformar los actínidos de larga vida en fragmentos de fisión de vida mucho más corta. Un ejemplo de transmutación por fisión es el siguiente:



A veces son necesarias varias reacciones nucleares de captura neutrónica y decaimiento radiactivo antes de que se produzca la fisión, como en el ejemplo siguiente:



En otras ocasiones, las reacciones nucleares son del tipo (n, 2n), sin ningún efecto práctico directo desde el punto de vista de reducción de la radiactividad. Sin embargo, estas reacciones pueden transformar un material fértil en otro fisible, con mayor probabilidad de ser fisionado. Bajo irradiación neutrónica se pueden recorrer todos los posibles caminos, aunque con distintas probabilidades, dependiendo del flujo de neutrones. Ello da lugar a un amplio conjunto de reacciones nucleares. Se considera completa la transmutación de un actínido cuando al final de una cadena se produce una fisión. Después de cada fisión, los nuevos neutrones pueden utilizarse para inducir más transmutaciones, y la energía producida para generar electricidad [1].

Se ha propuesto que, además del uso del plutonio, los actínidos menores pudieran utilizarse en un reactor de potencia. Ya se han realizado pruebas en las cuales se ha utilizado el americio como combustible [2]. En principio, sería posible obtener energía de la fisión de cualquier núcleo de actínido. Con un meticuloso diseño del combustible, se pueden consumir cierta cantidad de los actínidos presentes en él. Los actínidos menores pueden incorporarse al combustible nuclear como óxidos, aleaciones, o en forma heterogénea, contenidos en materiales inertes [3].

En la Fig. 1 se muestran los decaimientos α , β^- y CN de los actínidos y en la Tabla 1 se dan los valores de las secciones eficaces microscópicas de fisión y CN para energías térmicas del neutrón, así como la vida media de los actínidos [4].

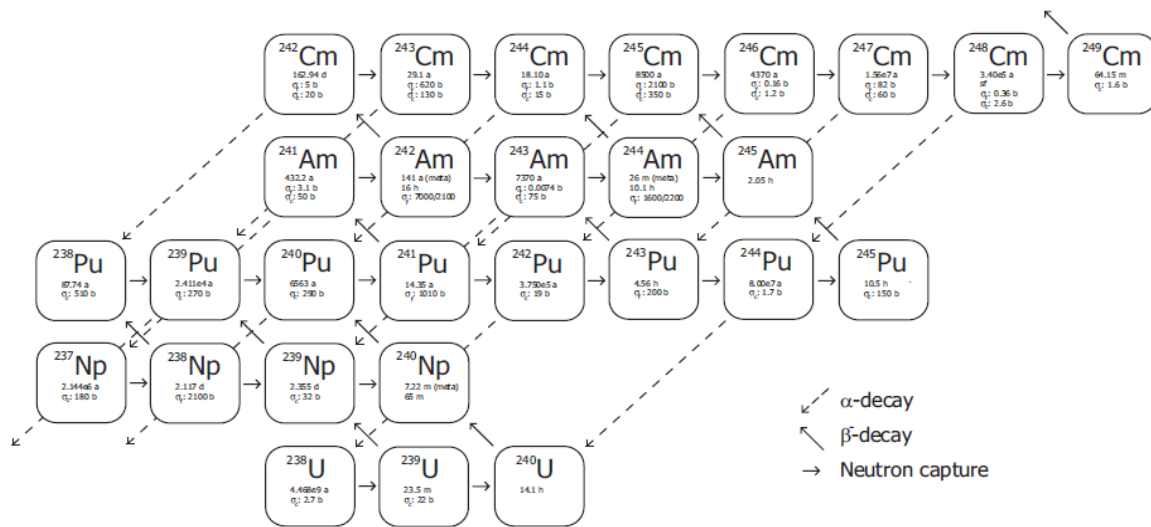


Fig. 1. Esquema de decaimientos α , β -y captura neutrónica del Uranio, Plutonio, Neptunio, Americio y Curio.

TABLA 1
DATOS NUCLEARES A 20 °C DEL URANIO, PLUTONIO, NEPTUNIO, AMERICIO Y CURIO

Núclido	Vida Media	σ_c (barns)	σ_f (barns)	Núclido	Vida Media	σ_c (barns)	σ_f (barns)
²³⁸ U	4.468X10 ⁹ a	2.7		²⁴¹ Am	432.2 a	50	3.1
²³⁹ U	23.5 m	22		^{242m} Am	141 a		7000
²⁴⁰ U	14.1 h			²⁴² Am	16 h		2100
²³⁷ Np	2.144 X10 ⁶ a	180		²⁴³ Am	7370 a	75	0.0074
²³⁸ Np	2.117 d		2100	^{244m} Am	26 m		1600
²³⁹ Np	2.355 d	32		²⁴⁴ Am	10.1 h		2200
^{240m} Np	7.22 m			²⁴⁵ Am	2.05 h		
²⁴⁰ Np	65 m			²⁴² Cm	162.94 d	20	5
²³⁸ Pu	87.74 a	510		²⁴³ Cm	29.1 a	130	620
²³⁹ Pu	2.411 X10 ⁴ a	270	750	²⁴⁴ Cm	18.10 a	15	1.1
²⁴⁰ Pu	6563 a	290		²⁴⁵ Cm	8500 a	350	2100
²⁴¹ Pu	14.35 a		1010	²⁴⁶ Cm	4370 a	1.2	0.16
²⁴² Pu	3.750e5 a	19		²⁴⁷ Cm	1.56 X10 ⁷ a	60	82
²⁴³ Pu	4.56 h		200	²⁴⁸ Cm	3.40 X10 ⁵ a	2.6	0.36
²⁴⁴ Pu	8.00 X10 ⁷ a	1.7		²⁴⁹ Cm	64.15 m	1.6	
²⁴⁵ Pu	10.5 h	150					

Nota: a = años; d = días; h = horas; m = minutos.

En la literatura encontramos que el diseño neutrónico de celdas de combustible para reactores de agua en ebullición se ha abordado desde varias aproximaciones de solución, [5], [6], [7]. En estos trabajos se han empleado tanto métodos basados en reglas de conocimiento como en técnicas heurísticas y metaheurísticas. En el tema de los reactores nucleares, además se encuentran algunas aplicaciones del algoritmo de evolución diferencial, como en [8], en donde se menciona ser la primera aplicación al tema de la ingeniería nuclear con el propósito de minimizar el factor de pico de potencia en diferentes zonas del núcleo de un reactor nuclear. En [9], se aborda el problema de la optimización de los intervalos de inspección del sistema HPIS (High Pressure

Injection System) en un reactor PWR. Si bien su potencial de aplicación es muy amplio, como puede notarse por ejemplo en [10], en donde se utiliza la potencialidad de este algoritmo para plantear un enfoque novedoso para el desarrollo de arquitecturas de modelos y conjuntos de hiperparámetros ajustados para la clasificación multimodal. O en [11], en donde se propone un novedoso algoritmo de evolución diferencial competitiva de adaptación independiente del historial de éxito para abordar los problemas de optimización funcional y la optimización de la trayectoria de misiones espaciales. Por otro lado, se han realizado estudios de transmutación de actínidos menores a través de la adición de éstos en el combustible que se utiliza en la operación de reactores de agua en ebullición [12], [13], [14], [15].

4

En este trabajo se propone un método evolutivo basado en la técnica de evolución diferencial (ED) [16] para diseñar neutrónicamente una celda típica de combustible de un reactor de agua en ebullición. El diseño de la celda consiste en encontrar la distribución óptima del material tanto físil como de control de reactividad en un arreglo 10x10 de varillas de combustible. En posiciones específicas de este arreglo se adiciona a dichos materiales un vector de actínidos. La elección de estas posiciones se hizo previamente, de manera tal que la aplicación del algoritmo solamente toma en cuenta la presencia de un vector de actínidos en una sola varilla de combustible a la vez. Los datos de las Tablas 1, 2 y 3, se usan como valores de referencia para la definición de los rangos de variación de la concentración de los isótopos considerados en el vector de actínicos menores.

El resto de este trabajo se organiza de la siguiente manera: En la siguiente sección se presenta el desarrollo del estudio propuesto; en la sección III se plantea la metodología utilizada para obtener el objetivo de estudio; en la sección IV, se muestra el análisis de los resultados; finalmente en la sección V se presentan las conclusiones derivadas del trabajo.

II. DESARROLLO

A. Actínidos menores generados en el combustible nuclear gastado

Las albercas de combustible nuclear gastado tienen el inconveniente de tener una capacidad de almacenamiento limitada para contener el combustible nuclear irradiado en los reactores nucleares de potencia. En particular en este trabajo se analizaron doce distintos tipos de combustibles almacenados en una alberca de combustible provenientes de un reactor de agua en ebullición y son descritos en la Tabla 2 [12].

TABLA 2
COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN UN REACTOR DE AGUA EN EBULLICIÓN

Arreglo del Combustible	Enriquecimiento de U-235 (%)	Quemado (MWd/TM)	Arreglo del Combustible	Enriquecimiento de U-235 (%)	Quemado (MWd/TM)
8x8	1.76	24955	8x8	3.52	43767
8x8	2.19	32311	8x8	3.46	41399
8x8	3.03	39121	10x10	3.72	47377
8x8	2.80	37191	10x10	3.70	48391
8x8	3.24	40617	10x10	3.69	45290
8x8	3.22	39441	10x10	3.86	38583

Con el código ORIGEN-S, el cual pertenece al sistema de códigos SCALE6 [17], [18], se estimó el porcentaje en masa de los contenidos de actínidos a distintos tiempos de decaimiento radiactivo, de los combustibles descritos en la tabla anterior, después de ser utilizados en el reactor de agua en ebullición, con el fin de conocer el comportamiento de la generación de actínidos en el combustible nuclear gastado; los resultados se muestran en la Fig. 2.

Porcentaje de Actínidos en el CNG

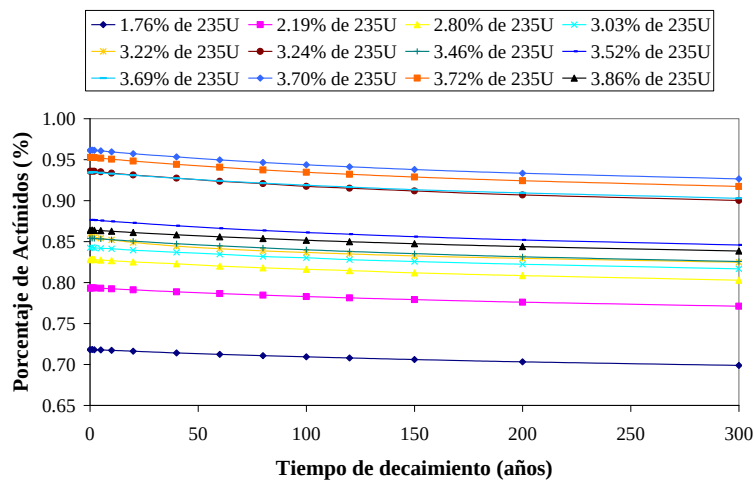


Fig. 2. Porcentaje de masa de actínidos (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , $^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{242}Cm , ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{237}Np y ^{239}Np) que hay en cada combustible nuclear gastado (CNG).

De lo anterior podemos notar que el ensamble de combustible gastado de UO_2 10x10 con enriquecimiento promedio de 3.70% de ^{235}U y quemado de 48.391 GWd/TM, es el que genera mayor cantidad de actínidos, el cual contiene a su descarga 0.0737% en masa de actínidos menores. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos por el código ORIGEN para este tipo de combustible.

TABLA 3
ACTÍNIDOS MENORES EN EL COMBUSTIBLE NUCLEAR GASTADO

Material	Masa (gr)	%	Material	Masa (gr)	%
^{241}Am	2.1069	0.0012	^{244}Cm	14.2600	0.0079
^{243}Am	8.1736	0.0045	^{237}Np	96.3400	0.0532
^{242}Cm	3.1780	0.0018	^{239}Np	9.2800	0.0051
^{243}Cm	0.0941	0.0001	Total	133.4327	0.0737

Debido a que el ^{239}Np (2.355 días) y ^{242}Cm (162.94 días) son de vidas medias cortas y el ^{243}Cm (0.0001 %) tiene una baja contribución a la generación de actínidos, por lo que no son tomados en cuenta para la formación del vector de actínidos menores que se propone para ser incorporados en las varillas de la celda. Por otra parte, estudios de pruebas experimentales para la incorporación de actínidos menores al combustible nuclear [19], muestran que es razonable incluirlos hasta en un 6%, como una primera aproximación, por lo que se toma como referencia este valor para el vector de actínidos menores (^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm y ^{237}Np), descrito en la Tabla 4, con el fin de reducirlos durante el quemado del combustible [13], [14].

TABLA 4
VECTOR DE ACTÍNIDOS MENORES

Isótopo	^{241}Am	^{243}Am	^{244}Cm	^{237}Np
% w	6.3258	24.5406	8.9136	60.2200

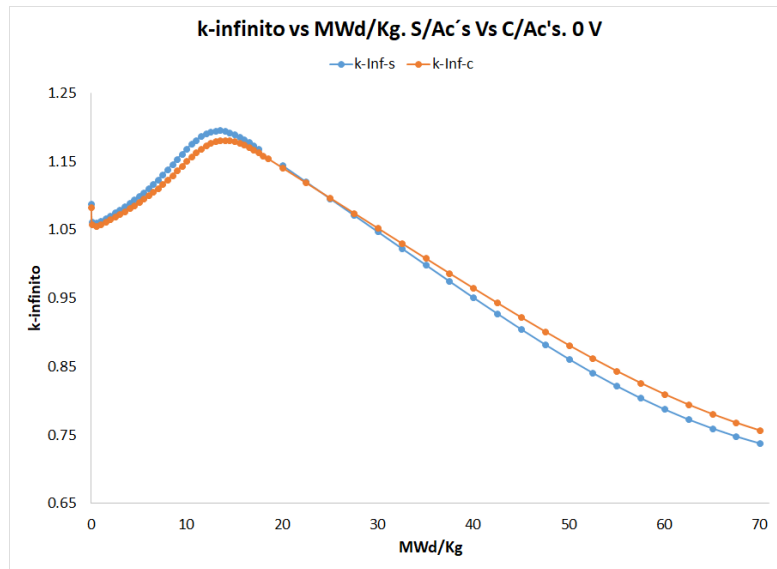


Fig. 4. Factor de multiplicación neutrónica en un medio infinito (k -infinito) con y sin la presencia de actínidos menores.

Las diferencias en pcm a través de la vida de la celda de combustible se muestra en la Fig. 5, cuando se comparan las condiciones con presencia vs sin presencia de actínidos menores. La diferencia mínima se observa en 25 MWd/kg. La diferencia máxima se observa en 57.5 MWd/kg.

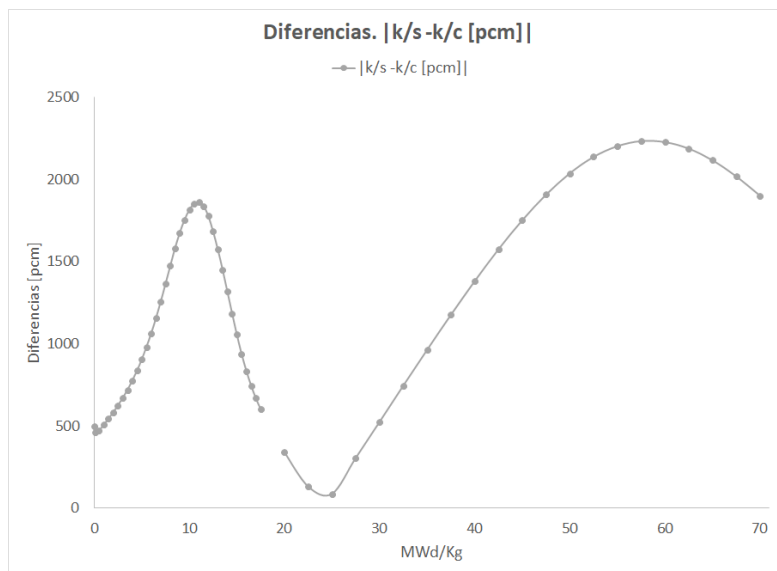


Fig. 5. Diferencias en k -infinito, con vs sin presencia de actínidos menores.

En la Fig. 6, se muestra el comportamiento del Factor de Pico de Potencia Local (del inglés, Local Power Peaking Factor – LPPF), se comparan los casos con vs sin presencia de actínidos menores. Se observa que el caso en que se adicionan actínidos menores a la celda, el LPPF se sobreestima con respecto al caso sin su presencia.

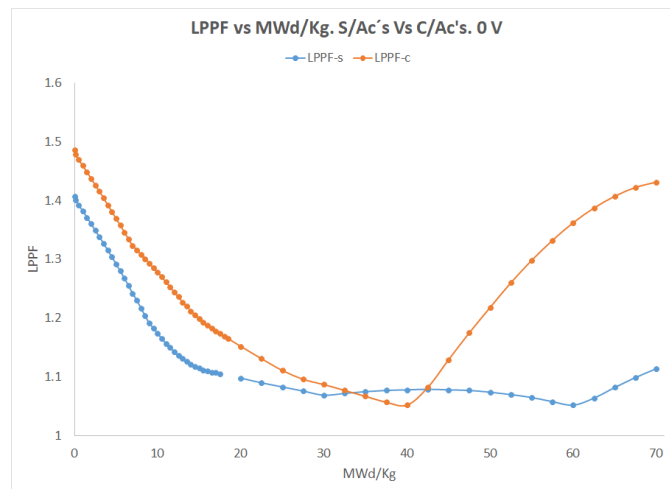


Fig. 6. Factor de Pico de Potencia Local (LPPF), con vs sin presencia de actínidos menores.

En la Fig. 7, se muestran las diferencias del LPPF, (%), de la celda sin (P/S) vs con (P/C) actínidos menores. Durante la primera mitad de la vida de la celda las diferencias son relativamente menores, respecto a la parte final de la vida de la celda de combustible. El comportamiento en esta Fig. 7, se debe principalmente a que conforme aumenta el quemado del combustible el efecto de mitigación de reactividad se ve disminuido principalmente por dos razones, primera; el agotamiento del veneno quemable presente en la etapa inicial de vida de la celda, segunda; por el efecto del aumento de la producción de plutonio en la misma.

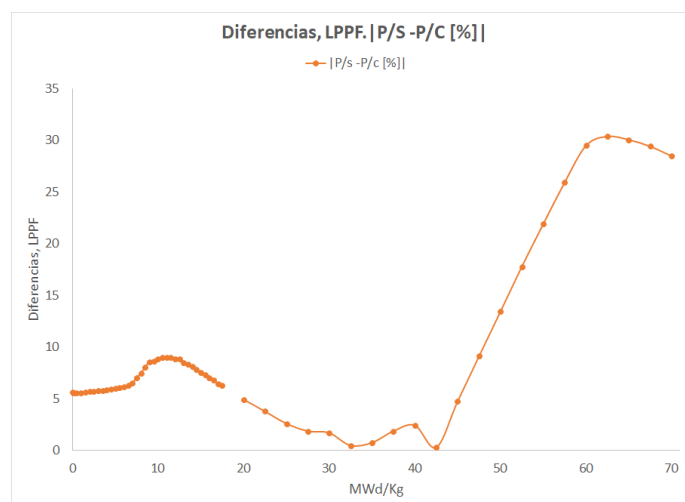


Fig. 7. Diferencias en LPPF, con vs sin actínidos menores.

1) Evaluación por varilla con la presencia de actínidos, 0V, celda heterogénea.

A partir de la celda de referencia, celda heterogénea, se estudia el impacto de la modificación en la composición de cada una de las varillas de combustible. En la Fig. 8, se muestra el comportamiento k-infinito y en la Fig. 9, bajo las mismas condiciones de simulación se muestra el comportamiento del LPPF de la celda.

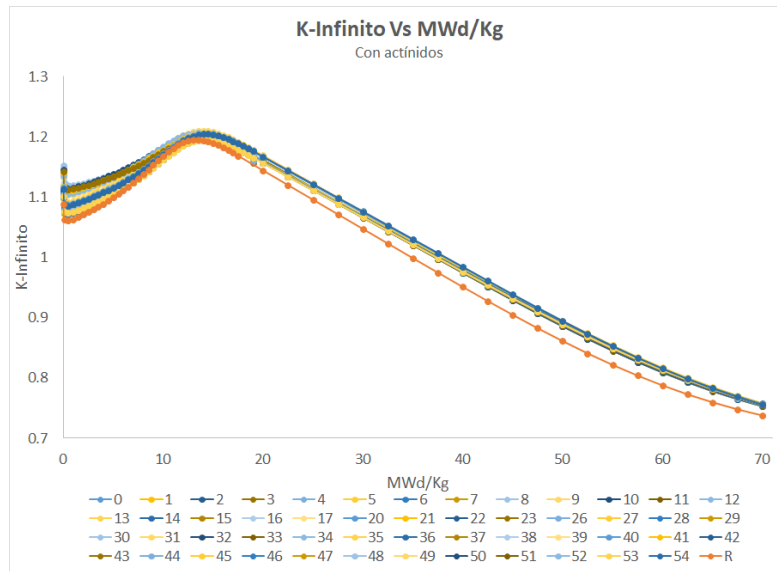


Fig. 8. k-infinito de la celda heterogénea.

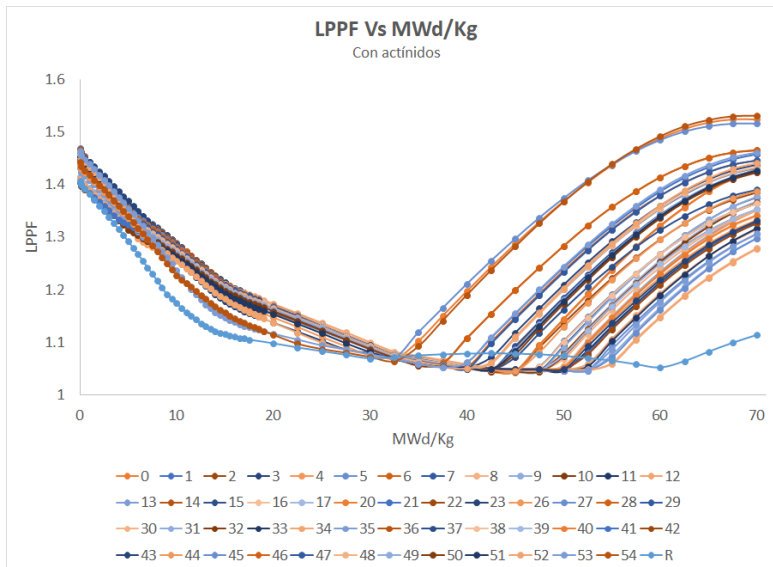


Fig. 9. LPPF de la celda heterogénea.

Los resultados mostrados en estas dos figuras (Fig. 8 y Fig. 9) se presentan con la intención de contrastar éstos con respecto a los mostrados en la sección inmediata posterior, esto es; los resultados de la Fig. 8 contra resultados de la Fig. 10, y los correspondientes a la figura 9 contra los resultados de la Fig. 11. Es interesante notar que para el caso del factor de pico de potencia local, los valores máximos se desplazan para el caso homogéneo con respecto del heterogéneo en alrededor de 20 MWd/Kg.

2) Evaluación por varilla con la presencia de actínidos, 0V, celda homogénea

Se homogeneiza la celda de referencia, ver Tabla 5, para este propósito se utiliza un único valor de enriquecimiento en U-235 para todas las varillas de combustible, excepto que para una de estas, se añade un vector con actínidos; con la finalidad de conocer el impacto de cada varilla individual sobre el comportamiento de la celda de combustible. Se usa el mismo vector para la evaluación una a una de todas las varillas del arreglo. El valor de enriquecimiento cuyos resultados se presentan corresponden al valor de 2.0 (w/o). Se realizaron un par de casos más, sin embargo, los resultados de estos otros dos presentan el mismo comportamiento. En la Fig. 10, se muestra el comportamiento de k-infinito. Este comportamiento ocurre cuando se altera la composición de las varillas de combustible una a una, añadiendo la presencia de actínidos menores en ellas, pero sin la presencia de veneno neutrónico quemable (s/Gd₂O₃). En la Fig. 11, se muestra el comportamiento del parámetro LPPF, bajo estas mismas consideraciones.

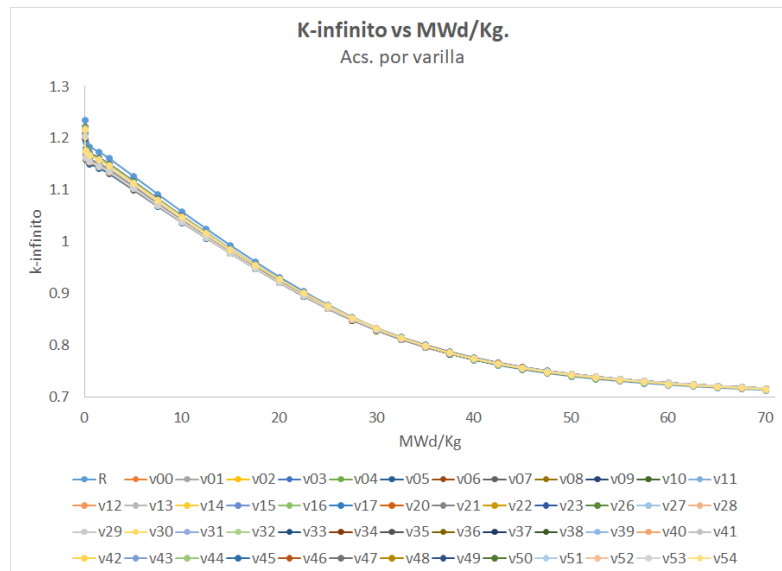


Fig. 10. k-infinito. Celda homogénea con actínidos menores.

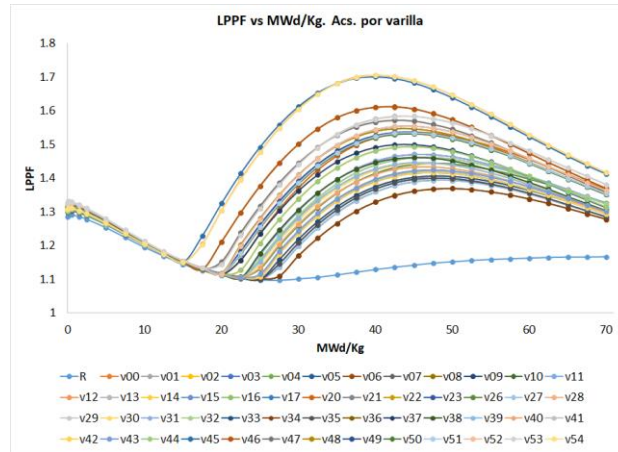


Fig. 11. LPPF. Celda homogénea con actínidos menores.

3) Evaluación por varilla con la presencia de actínidos, 0-90 %V

A partir de la celda de referencia se realizaron cálculos para conocer el desempeño de la presencia de Am-241, Am-243, Cm-244 y Np-237. Se presentan los casos de mayor y menor presencia, es decir; aquellas varillas en donde estos valores ocurren como función del contenido de vacíos (%). A partir de los resultados mostrados en esta sección puede observarse qué varillas se eligieron para aplicar el algoritmo evolutivo al diseño de la celda considerando la presencia de un vector de actínidos menores en éstas. La presente aproximación de solución al problema de diseño neutrónico con actínidos menores permitió un sustancial ahorro de tiempo de máquina; pues aplicarlo a cada varilla del arreglo implicaría un considerable aumento de éste.

En el caso del Am-241 (véase Fig. 12), el valor mínimo promedio se observa en la varilla con el número de identificación número 54 (véase Fig. 3). El valor máximo promedio se observa en la varilla número 8.

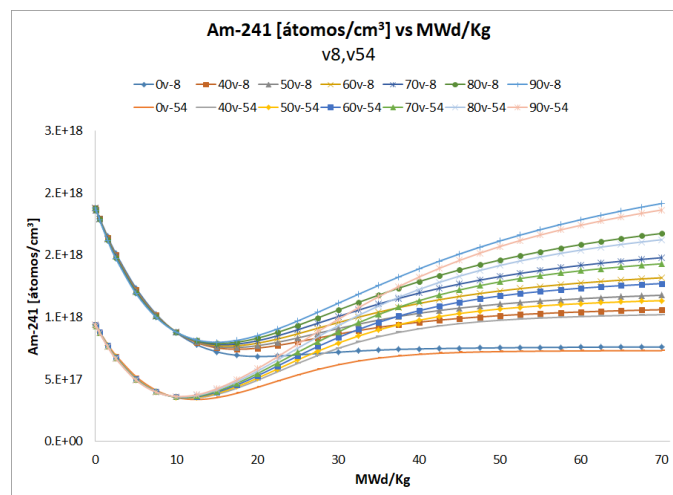


Fig. 12. Presencia de Am-241 (átomos/cm³). Valores extremos.

En el caso del Am-243 (véase Fig. 13), el valor mínimo promedio se observa en la varilla con el número de identificación número 0 (véase Fig. 3). El valor máximo promedio se observa en la varilla número 34.

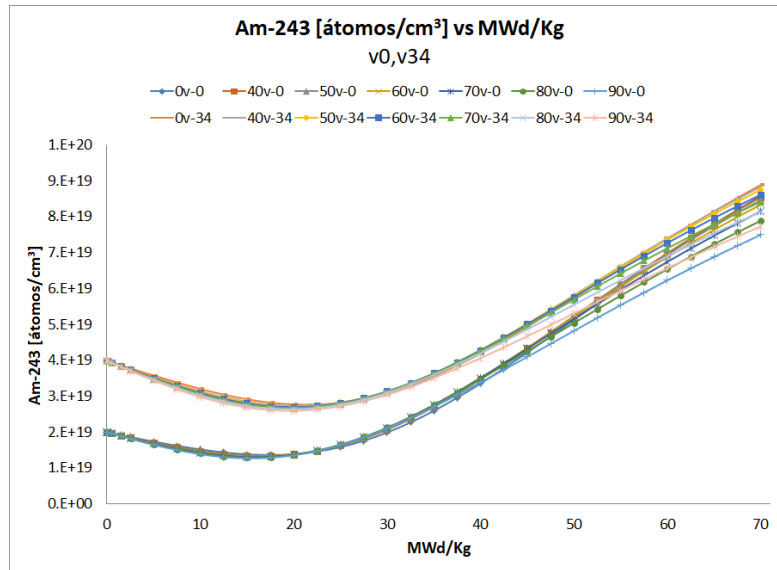


Fig. 13. Presencia de Am-243 (átomos/cm³). Valores extremos.

En el caso del Cm-244 (véase Fig. 14), el valor mínimo promedio se observa en la varilla con el número de identificación número 54 (véase Fig. 3). El valor máximo promedio se observa en la varilla número 45.

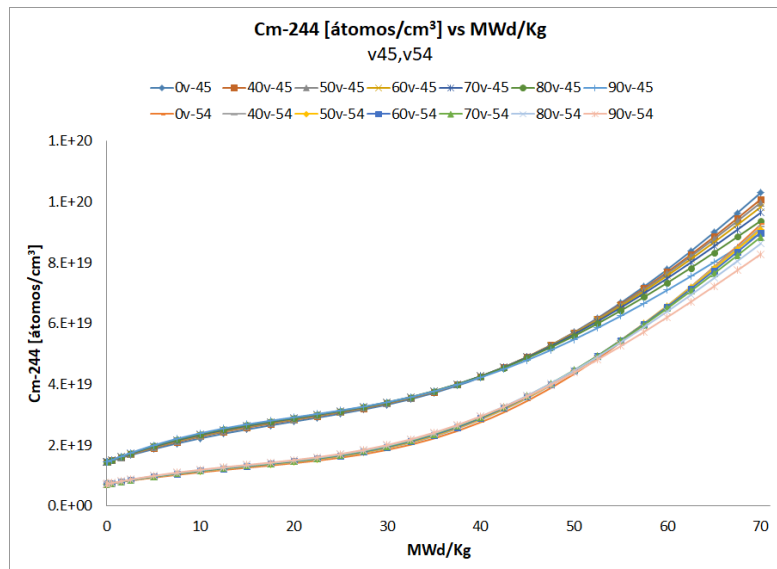


Fig. 14. Presencia de Cm-244 (átomos/cm³). Valores extremos.

En el caso del Np-237 (véase Fig. 15), el valor mínimo promedio se observa en la varilla con el número de identificación número 0 (véase Fig. 3). El valor máximo promedio se observa en la varilla número 34.

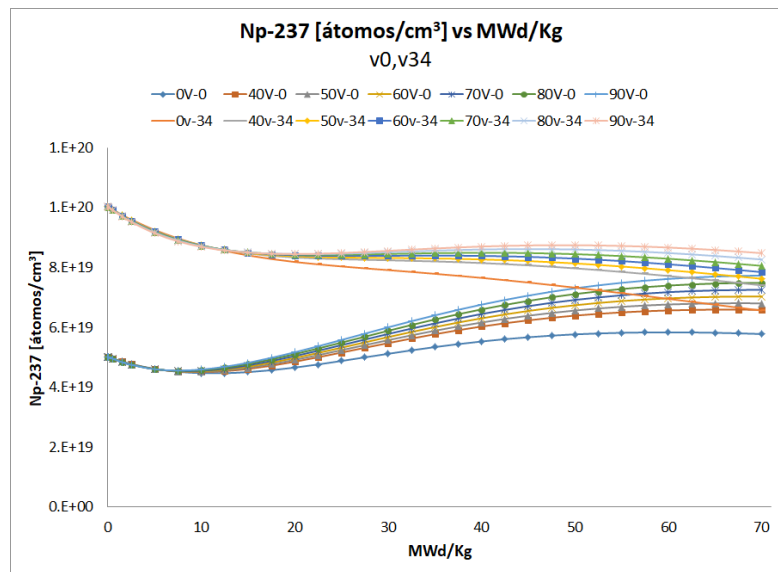


Fig. 15. Presencia de Np-237 (átomos/cm³). Valores extremos.

Con base en estos resultados surge la posibilidad de plantear diseños diferenciados espacialmente, es decir; considerar las varillas 8 y 54 para asociar la presencia de Am-241, Fig. 12; las varillas 0 y 34 para el caso de del Am-243, Fig. 13; las posiciones 45 y 54 para el caso del Cm-244, Fig. 14; y nuevamente las posiciones 0 y 34 dentro del arreglo para la ubicación preferente del Np-237, Fig. 15.

III. METODOLOGÍA

Como se muestra en la sección anterior, los parámetros asociados al comportamiento nuclear de una celda de combustible presentan una variabilidad notable. De dónde surge la iniciativa, de abordar métodos que permitan encontrar tanto una distribución como una combinación de los materiales del combustible en un arreglo de varillas típicamente utilizado en un reactor de potencia como el de agua en ebullición. Con esta finalidad en este trabajo se propone implementar un algoritmo evolutivo basado en la técnica conocida como evolución diferencial [16].

El problema que abordamos en el presente trabajo tiene la particularidad que da la pauta para considerar las propiedades de desempeño de un algoritmo basado en ED, específicamente es el hecho de que deseamos conocer las concentraciones de cada uno de los isótopos de los actínidos de interés. Estas concentraciones, como es de suponer, no están estandarizados en los actuales diseños de combustible para reactores nucleares de agua en ebullición. De donde es deseable contar con un algoritmo que sea aplicable a espacios continuos de las variables de decisión que definen el alcance del problema a resolver.

Las variables de decisión que se utilizan en el proceso de diseño son:

- a) el enriquecimiento promedio en U-235 (w/o),
- b) la concentración de trióxido de gadolinio Gd_2O_3 (w/o),

- c) el factor de multiplicación neutrónica en un medio infinito,
- d) el factor de pico de potencia local de la celda de combustible, y
- e) concentraciones de los isótopos Np-237, Am-241, Am-243, Cm-244 (w/o).

El algoritmo ED es un algoritmo de optimización combinatoria similar a los algoritmos genéticos [22]. Básicamente consiste en evolucionar poblaciones de soluciones con el fin de encontrar una solución óptima. Es decir que cumpla con todos y cada uno de los requisitos y restricciones impuestas a la solución del problema abordado.

A. Parámetros del algoritmo ED

En un algoritmo de tipo ED, se tienen tres parámetros principales, a saber:

- Probabilidad de recombinación (**CR**), en este parámetro se determina la probabilidad de que cada gen del vector solución sufra una mutación o variación. Este parámetro varía de 0.0 a 1.0.
- Peso diferencial (**F**), este parámetro se encuentra típicamente entre 0.0 y 2.0, representa la magnitud de la variación que los genes del nuevo vector sufrirán.
- Tamaño de población (**NP**), este parámetro describe el tamaño de la población. Este parámetro es muy intuitivo, indica el número de individuos en la población.

El pseudo-código de un algoritmo ED se muestra a continuación (véase Fig. 16):

Definición de parámetros

NP = tamaño de población

CR = probabilidad de mutación/recombinación

F = peso diferencial

Inicializar población de soluciones

Para cada n desde 1 hasta num:

Para cada solución X en la población:

Crear un vector X_{+1}

Elección de otras tres soluciones A, B y C diferentes entre sí y diferentes de X

Para cada componente X_i en X:

Generar un número aleatorio R entre 0.0 y 1.0:

Sí $R < CR$:

$$X_{+1}^i = a_i + F \cdot (b_i - c_i)$$

Sí $R \geq CR$:

$$X_{+1}^i = X_i$$

Sí el valor de aptitud de $X_{+1} \geq$ valor de aptitud de X:

Reemplazar X con X_{+1} en la población

Sí el valor de aptitud de $X_{+1} <$ valor de aptitud de X:

No reemplazar X en la población

Fig. 16. Algoritmo evolutivo.

En la Fig. 17, se muestra el estado del proceso de búsqueda cuando se genera una solución nueva, el vector $\vec{v}$, a partir de tres soluciones correspondientes a la misma generación g. Con fines ilustrativos se adopta la notación vectorial. Además, en dicha figura (Fig. 17) se asume que el espacio de búsqueda mostrado corresponde a un

espacio bidimensional. Como se muestra en la Fig. 17, cada nueva solución que formará la generación siguiente en el proceso, se genera a partir de tres vectores distintos dentro de la generación vigente.

15

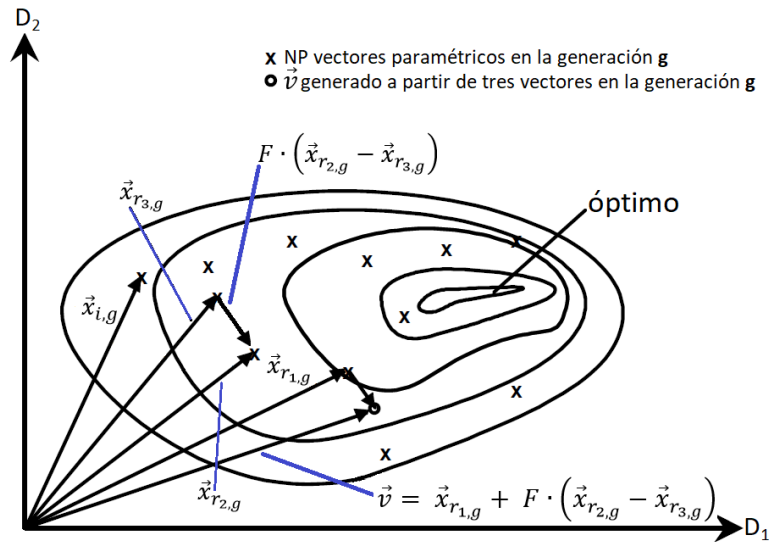


Fig. 17. Generación de soluciones en la generación g.

Para más detalles de cómo funciona este algoritmo, se recomienda a los lectores consultar la referencia [16].

La forma en que se procedió para obtener diseños de celdas de combustible que cumplieran con los requisitos mencionados anteriormente se describe a continuación.

La elección de las posiciones dentro de la celda de combustible en las cuáles se incluyó el vector de actínidos menores descrito en la tabla 5, se tomó de los resultados mostrados en la sección anterior. Se encontró que de manera notable ciertas varillas dentro del arreglo de la celda mostraban un impacto sobresaliente en los parámetros de diseño de la celda de combustible. De donde, se utiliza el siguiente conjunto de posiciones posibles: {v00, v05, v08, v26, v34, v45, v54}, (véase Fig. 3). A diferencia del procedimiento seguido para la evaluación del impacto de la presencia de actínidos en cada una de las posiciones de la celda de combustible, en donde se utilizó en vector de actínidos preestablecido una a una, para evaluar su efecto en la celda. Para el caso del diseño de las celdas mediante el algoritmo ED, la concentración de cada uno de los isótopos de los actínidos se asume como incógnita. Es decir, el algoritmo ED implementado encuentra las concentraciones de cada uno de los isótopos de neptunio, americio y curio, que se incorporan a la celda en una sola varilla, que junto con las otras variables de decisión satisfagan los criterios y requerimientos establecidos en el proceso de obtención de soluciones. En otras palabras, el algoritmo ED, encuentra para cada varilla de combustible del arreglo un valor de U-235 (w/o) y uno de Gd₂O₃ (w/o), y además para una sola de estas varillas también encuentra un vector de actínidos.

Para encontrar soluciones aceptables por medio del algoritmo evolutivo propuesto, se sigue la secuencia de pasos mostrada en la Fig. 16. Como puede notarse en dicha secuencia se requiere contar con una forma de asignar valores de aptitud a cada una de las soluciones generadas por el algoritmo. Esto se logra mediante una función de aptitud o función objetivo (FO). La función objetivo utilizada en este trabajo se muestra en la ecuación (3).

La función objetivo (FO) usada en el proceso de búsqueda es la siguiente:

$$FO(x_n) = C + \sum_{n=1}^N w_n f(x_n) \quad (3)$$

donde w_n se selecciona según su importancia relativa, estos valores se normalizaron a partir de los rango de valores posibles para cada una de las variables de decisión. Respecto de la definición de los términos $f(x_n)$, éstos fueron definidos como:

$$f(x_n) = |p o_n - p x_n| \quad (4)$$

donde

$p o_n$, representa cada uno de los parámetros ideales u objetivo para cada variable de decisión

$p x_n$, indica cada uno de los n parámetros utilizados como variables de decisión

N representa el número de variables de decisión utilizadas en el proceso de búsqueda.

C es un valor constante arbitrario. Para este caso, C es igual a 1.0.

Respecto a los requerimientos que cada uno de los términos de la función objetivo en la ecuación (1) se deben cumplir, se tiene lo siguiente:

- El enriquecimiento promedio de la celda de combustible debe ser inferior al valor de referencia, pero la diferencia no debe ser mayor que el 1% con respecto a dicho valor de referencia, ver Tabla 5. La intención de buscar soluciones con valores de enriquecimientos inferiores al valor de referencia, cumpliendo a la vez con el resto de restricciones; permitiría prever una reducción en el costo de generación de energía con el combustible propuesto.
- El contenido de trióxido de gadolinio (Gd_2O_3) (w/o), referido también como gadolinia; de la celda de combustible debe estar dentro de un rango de $\pm 1\%$ con respecto al valor de referencia. Es importante mencionar que esta variable se está considerando básicamente, en nuestro estudio; para controlar el exceso de reactividad al inicio de la vida de la celda. Éste es importante, pues tiene una relación directa con las condiciones de operación al inicio de la operación del reactor.
- El factor de multiplicación neutrónica (k -infinito) de la celda de combustible debe estar dentro del rango de ± 100 pcm con respecto al valor de referencia. Para esta variable se exige mayor precisión, ya que alejarse del valor de referencia, puede afectar el arranque del ciclo de operación, implicando mayores maniobras para el control de reactividad, en el caso de que la propuesta de combustible tenga un valor de k -infinito relativamente más elevado; o bien, problemas para alcanzar el nivel de potencia planeado para el arranque del reactor.
- El factor de pico de potencia local debe ser menor o igual al valor de referencia. Este parámetro tiene importancia para la satisfacción de los márgenes a los límites térmicos en el desempeño del combustible. Por lo cual, es importante disminuirlo en la medida posible.
- Las concentraciones de los isótopos de ^{237}Np (w/o), ^{241}Am (w/o), ^{243}Am (w/o), y ^{244}Cm (w/o) deben estar dentro de los rangos definidos para el presente estudio. El valor de referencia representa la incorporación de estos isótopos al combustible en un 6% (véase Tabla 4), el rango de requerimiento representa el (4%, 10%) de los actínidos menores presentes en el combustible nuclear. Para estas variables de decisión, se propone reproducir el alcance realizado en un estudio previo [12].

Las restricciones establecidas para el presente estudio abarcan las principales variables de decisión que permiten proponer una celda de combustible para la operación de un reactor nuclear de agua en ebullición.

TABLA 5
VALORES OBJETIVO PARA EL PROCESO DE DISEÑO DE LA CELDAS DE COMBUSTIBLE

Parámetro	Valor de Referencia (Ref)	Requerimiento
^{235}U (w/o)	4.104	(0.99*Ref , Ref)
Gd_2O_3 (w/o)	3.78	Ref $\pm$ 1%
k-infinito	1.08757	Ref $\pm$ 100 pcm
LPPF	1.407	$\leq$ Ref
^{237}Np (w/o)	3.61320	(2.12336, 5.30840)
^{241}Am (w/o)	0.37955	(0.22305, 0.55782)
^{243}Am (w/o)	1.47243	(0.86530, 216325)
^{244}Cm (w/o)	0.53482	(0.31429, 0.78574)

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados que se generaron al aplicar el algoritmo evolutivo al proceso de diseño neutrónico de celdas de combustible. El algoritmo ED se ejecutó en siete ocasiones, esto con base a un número igual de posiciones que se seleccionaron durante el estudio previo en donde se analizó el impacto que tenía el hecho de incorporar actínidos en las varillas del arreglo de una celda de combustible, una a una; se encontró que aquellas posiciones preferentes fueron las varillas v00, v05, v08, v26, v34, v45, y v54, éstas se muestran en la Fig. 3.

Inicialmente en la Fig. 18 se presenta un caso representativo de la serie de resultados encontrados, los cuales corresponden al caso en el que se incluyen actínidos menores en la posición v00 de la celda de combustible, en esta Fig. 18 se muestra el proceso de minimización de la función objetivo. De esta gráfica se puede notar que a partir de la iteración 344 se ha alcanzado el valor mínimo de esta función. Tomando en cuenta que en cada iteración se ejecuta 10 veces la función objetivo. Se puede concluir que el algoritmo requirió de 3440 ejecuciones del código CASMO para encontrar una solución satisfactoria.

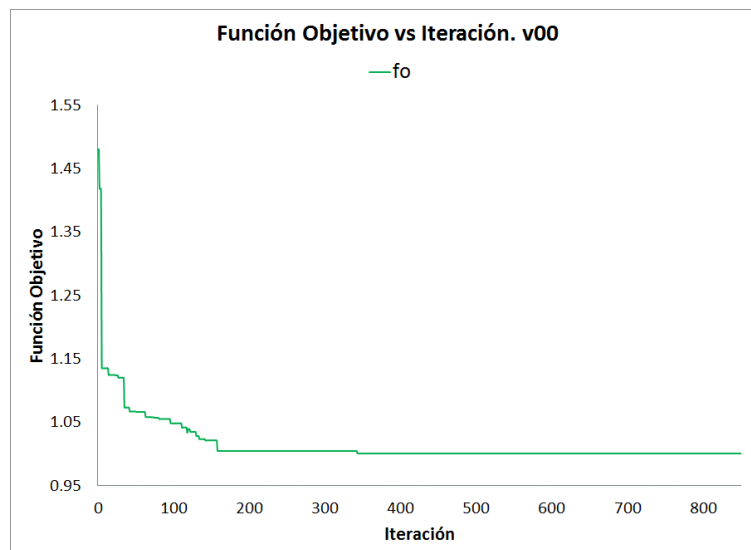


Fig. 18. Función objetivo, v00.

En la Fig. 19, se presenta el comportamiento del enriquecimiento promedio de la celda de combustible, como puede notarse en la figura, la satisfacción del requerimiento establecido para esta variable se cumplió a partir de la iteración 158. En la Fig. 20, se presenta el comportamiento del enriquecimiento promedio de la concentración de Gd_2O_3 (w/o) en la celda de combustible a través del proceso iterativo de diseño, respectivamente. A partir de la iteración 142 se cumple el requerimiento impuesto al contenido de gadolinia.

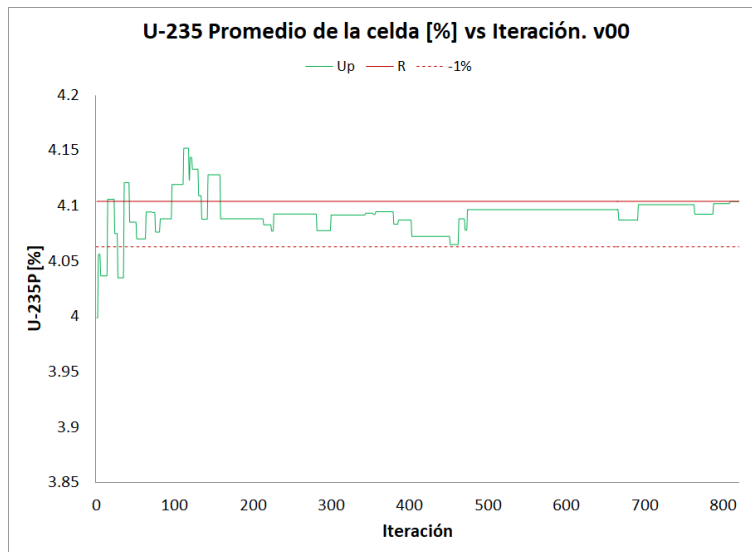


Fig. 19. Enrichment average of U-235 (w/o) in the cell, v00.

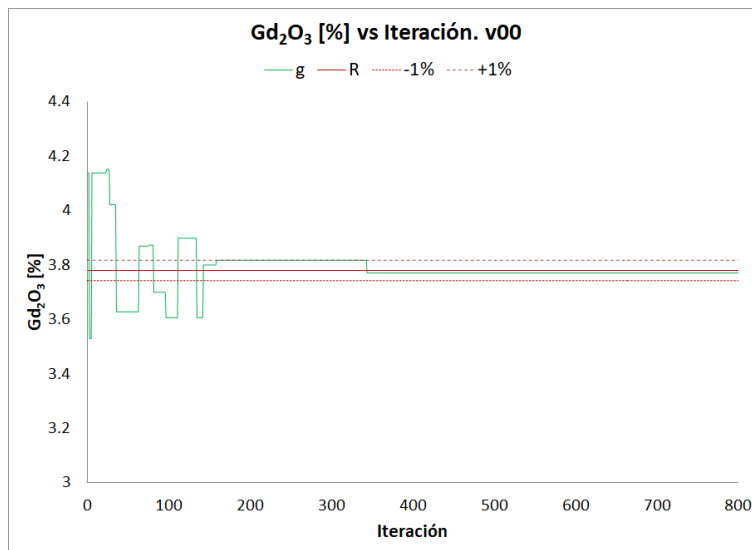


Fig. 20. Concentration average of Gd_2O_3 (w/o) in the cell, v00.

En la Fig. 21 y Fig. 22, se presenta tanto el comportamiento de k -infinito y el LPPF en la celda de combustible a través del proceso iterativo de diseño, correspondientemente. El número de iteraciones que se realizaron para cumplir el requerimiento establecido para esta variable fue mayor que en los casos anteriores, U-235, Gd_2O_3 ; fue a partir de la iteración 226 que se logró encontrar una solución que cumpliera con la precisión requerida.

En este caso, $v00$, el cumplimiento de la restricción establecida para el factor de pico de potencia local de la celda de combustible se cumplió en la gran mayoría de las soluciones encontradas por el algoritmo, el valor mínimo obtenido fue de 1.325, sin embargo; la celda con este valor no cumplió con el resto de restricciones aplicadas a las otras variables de decisión.

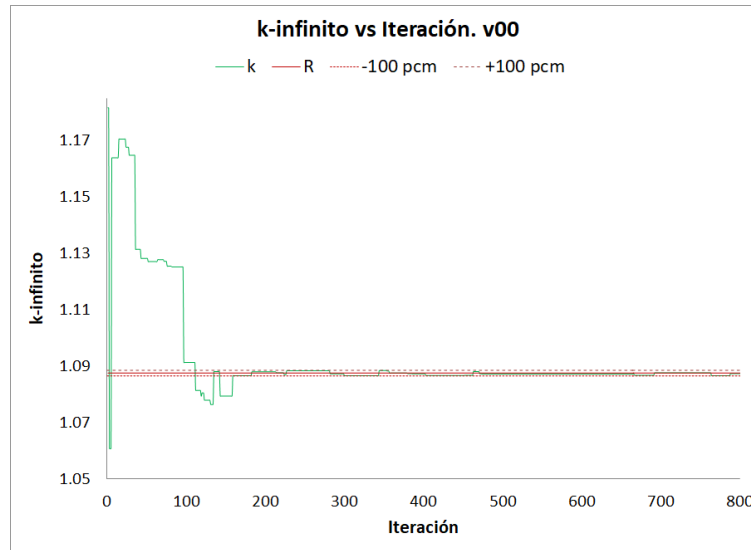


Fig. 21. k-infinito de la celda, $v00$.

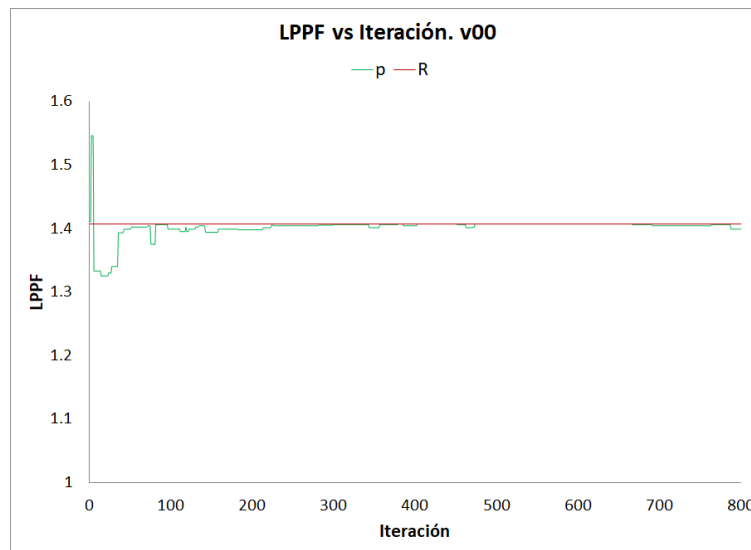


Fig. 22. LPPF de la celda, $v00$.

En las Fig. 23, Fig. 24, Fig. 25 y Fig. 26, se muestran los comportamientos de las concentraciones del Np-237 (w/o), Am-241 (w/o), Am-243 (w/o) y Cm-244 (w/o) de la varilla v00 en la celda de combustible a través del proceso iterativo de diseño, en el orden dado.

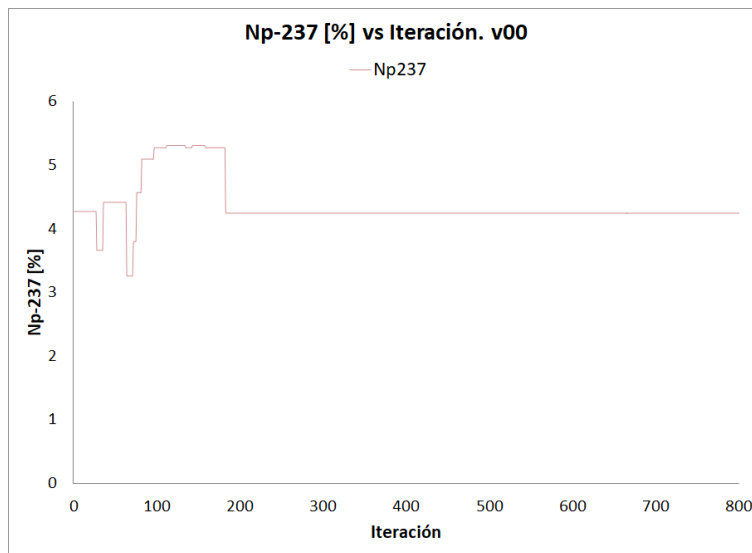


Fig. 23. Np-237 (w/o) de la varilla v00.

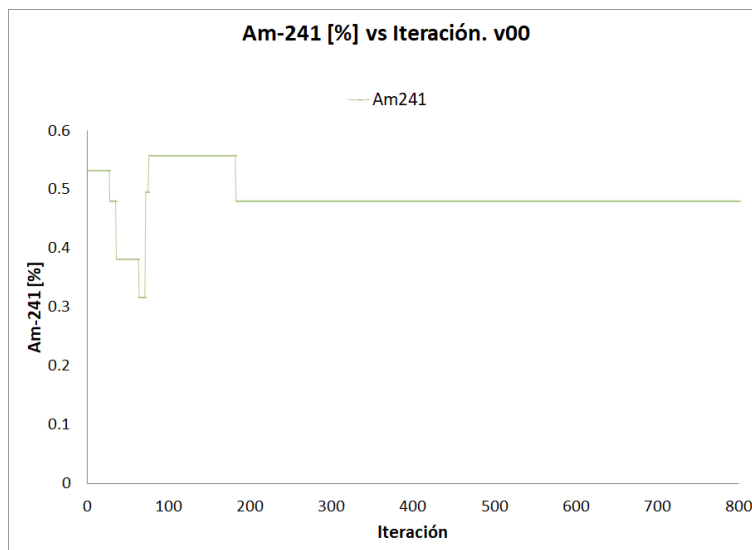


Fig. 24. Am-241 (w/o) de la varilla v00.

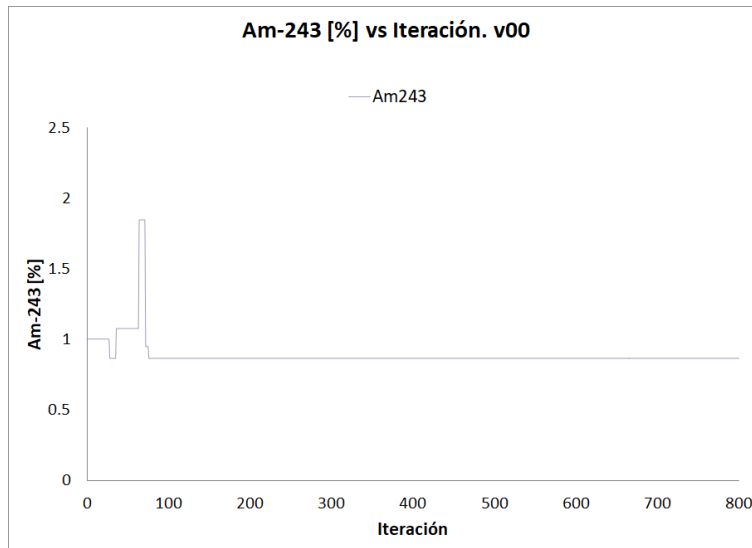


Fig. 25. Am-243 (w/o) de la varilla v00.

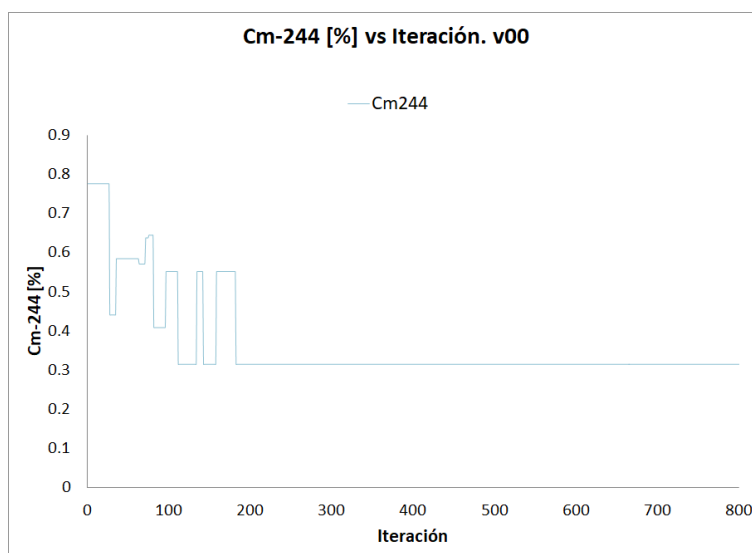


Fig. 26. Cm-244 (w/o) de la varilla v00.

En la iteración 344, la función objetivo toma el valor de 1.00120971, para el resto de variables los valores correspondientes son 4.09334, 3.77117, 4.09334, 1.08847, y 1.401, para el enriquecimiento en U-235 (w/o), contenido de gadolinio (w/o), k-infinito, y LPPF; respectivamente. Estos valores cumplen las respectivas restricciones establecidas para la búsqueda realizada mediante el algoritmo evolutivo implementado. Se encuentran en los intervalos (4.06296, 4.104), (3.7422, 3.8178), (1.08657, 1.08857) y el factor del pico de potencia correspondiente es menor que el valor de referencia el cual es 1.407; respectivamente.

El vector de actínidos se forma por 4.2479 (w/o) de Np-237, 0.48093 (w/o) de Am-241, 0.8653 (w/o) de Am-243, y 0.31429 (w/o) de Cm-244. Para estos valores se observa la misma tendencia que la observada en la celda de referencia. Con base en estos resultados es conveniente considerar estudios con un mayor alcance, es decir;

de manera selectiva preferir ciertas posiciones para la optimización de uno o unos componentes del vector de actínidos, con respecto al resto.

En la Tabla 6 y Tabla 7, se muestran las diferencias en U-235 promedio y Gd_2O_3 promedio en (%) de la celda de combustible respecto al valor de referencia, correspondientemente, AE indica valores generados con el algoritmo evolutivo. De la Tabla 8 y Tabla 9, podemos observar las diferencias en k-infinito (pcm) y LPPF (%) de la celda de combustible con respecto al valor de referencia, respectivamente, AE indica valores generados con el algoritmo evolutivo. Finalmente, la Tabla 10, muestra las concentraciones de los actínidos menores (Np237, Am241, Am243 y Cm244) considerados en el diseño de las celdas de combustible (%).

De los siete casos analizados, el caso que muestra el mejor comportamiento desde el punto de vista del enriquecimiento promedio en U-235 (w/o) es aquel en el que el vector de actínidos se añade a la varilla 34. Esto es debido a que la diferencia en U-235 es la mayor de todos los casos considerados. Cuando el vector de actínidos se agrega a la varilla 00, el enriquecimiento en U-235 de la celda obtenida es muy similar a aquel que corresponde a la celda de referencia (véase Tabla 6).

TABLA 6
DIFERENCIAS EN U-235 PROMEDIO DE LA CELDA

	Ref.	AE	Δ
Celda c/Act en	U-235 Pro. (%)	U-235 Pro. (%)	(Ref-AE)/Ref (%)
v00	4.104	4.10377	0.00560
v05	4.104	4.09663	0.17958
v08	4.104	4.10224	0.04288
v26	4.104	4.10334	0.01608
v34	4.104	4.06934	0.84454
v45	4.104	4.08622	0.43324
v54	4.104	4.10342	0.01413
min		4.06934	0.00560
MAX		4.10377	0.84454

Se puede notar en la Tabla 7, que los casos en donde se logra disminuir en mayor medida el enriquecimiento en U-235, corresponden también a aquellos casos con la mayor diferencia en contenido de gadolinio.

TABLA 7
DIFERENCIAS EN Gd_2O_3 PROMEDIO DE LA CELDA

	Ref	AE	Δ
Celda c/Act en	Gd_2O_3 Pro. (%)	Gd_2O_3 Pro. (%)	(Ref-AE)/Ref (%)
v00	3.78	3.77117	0.23360
v05	3.78	3.77117	0.23360
v08	3.78	3.77654	0.09153
v26	3.78	3.79430	-0.37831
v34	3.78	3.80854	-0.75503
v45	3.78	3.81310	-0.87566
v54	3.78	3.79885	-0.49868
min		3.77117	-0.87566
MAX		3.81310	0.23360

Las diferencias más grandes para el factor k-infinito (véase Tabla 8) también se presentan en los casos donde las diferencias para U-235 y gadolinio son mayores. Los resultados para el cumplimiento de la restricción establecida para el factor de pico local de potencia en la celda (véase Tabla 9), parece indicar que cuando una sola varilla en el arreglo se añade un vector de actínidos no repercute significativamente en el desempeño de la misma.

TABLA 8
DIFERENCIAS EN K-INFINITO DE LA CELDA

	Ref	AE	Δ
Celda c/Act en	k-infinito	k-infinito	(Ref-AE) (pcm)
v00	1.08757	1.08819	-52.38775
v05	1.08757	1.08840	70.11846
v08	1.08757	1.08681	-64.29878
v26	1.08757	1.08766	7.60838
v34	1.08757	1.08844	73.49496
v45	1.08757	1.08854	81.93513
v54	1.08757	1.08812	46.47599
min		1.08681	7.60838
MAX		1.08854	81.93513

TABLA 9
DIFERENCIAS EN EL LPPF DE LA CELDA

	Ref	AE	Δ
Celda c/Act en	LPPF	LPPF	(Ref-AE)/Ref (%)
v00	1.407	1.402	0.35537
v05	1.407	1.402	0.35537
v08	1.407	1.382	1.77683
v26	1.407	1.401	0.42644
v34	1.407	1.405	0.14215
v45	1.407	1.391	1.13717
v54	1.407	1.401	0.42644
min		1.382	0.14215
MAX		1.405	1.77683

Para las concentraciones de los actínidos menores estudiados, presentados en la Tabla 10, y recordando que la celda utilizada tiene simetría espejo sobre la diagonal, para el caso del Np-237 la posición más conveniente es la varilla 45, es decir donde se puede colocar un porcentaje mayor dentro de la celda de combustible, de este material. El Am-241, tiene su máximo en la varilla 34, cerca de la diagonal, un resultado similar se obtuvo para el máximo del Am-243, en la varilla 8; para el Cm-244, tiene su máximo en la varilla de la esquina número 54. Por lo que, derivado de este estudio, podemos decir que para el Np y Cm las posiciones más convenientes son las esquinas (varillas 45 y 54), y para el Am son las varillas 8 y 34, las cuales están cercanas a la diagonal. Además de que se puede considerar la opción de colocar los materiales por separado y no en conjunto, como se propone en la celda de referencia. Es decir, varillas de combustibles con un solo actínido menor, colocado de manera selectiva, respaldado por lo mostrado en este estudio.

TABLA 10
CONCENTRACIONES DE ACTÍNIDOS MENORES EN LA CELDA DE COMBUSTIBLE

Celda c/Act en	Np237 (%)	Am241 (%)	Am243 (%)	Cm244 (%)
v00	4.24790	0.48093	0.86530	0.31429
v05	4.78935	0.48773	1.80678	0.64698
v08	2.77504	0.22305	2.16325	0.31429
v26	2.44181	0.24226	1.43785	0.78574
v34	5.30840	0.55782	1.73038	0.60348
v45	5.30840	0.32862	2.13376	0.31429
v54	2.12336	0.22305	0.86530	0.78574
min	2.12336	0.22305	0.86530	0.31429
MAX	5.30840	0.55782	2.16325	0.78574

V. CONCLUSIONES

Se presentó una aproximación de solución al diseño neutrónico de celdas con arreglo típico de 10x10 de varillas de combustible de un reactor de agua en ebullición. El diseño incorpora un vector de actínidos menores formado por Np-237, Am-241, Am-243 y Cm-244, en una de las varillas de combustible. Con el propósito de conocer con antelación cuales posiciones dentro del arreglo 10x10 contendrían un vector de actínidos menores, se realizó, por una parte, la estimación del contenido de éstos en el combustible gastado utilizado en la operación de un reactor de agua en ebullición mediante el código ORIGEN-S, por otra parte, se evaluó el impacto de su presencia en los parámetros de una celda de combustible representativa. Se identificaron siete posiciones en el arreglo 10x10 para añadir un vector de actínidos. Los parámetros de las celdas de combustible utilizados en el diseño fueron el enriquecimiento promedio en U-235 (w/o), el contenido de trióxido de gadolinio (w/o), el factor de multiplicación de neutrones, el factor de pico de potencia local, y el vector de actínidos menores. Cada uno de estos parámetros se determinó mediante la aplicación de un algoritmo evolutivo tipo ED, evolución diferencial. Se generaron siete celdas de combustible y se mostró un caso representativo de éstos. Con el propósito de ampliar el alcance de los resultados mostrados, es necesario realizar estudios de simulación 3D del reactor para conocer el desempeño de los diseños de celdas de combustible obtenidos en el presente trabajo.

CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **EMC**; Metodología: **JLMT**; Software: **JLMT**, **EMC**; Investigación: **EMC**, **JLMT**; Redacción y preparación del borrador original: **EMC**; Redacción, revisión y edición: **JLMT**, **JRRS**; Supervisión: **JRRS**; Análisis formal: **JLMT**, **EMC**, **JRRS**; Administración del proyecto: **EMC**, **JLMT**; Adquisición de fondos: **JLMT**.

Financiamiento: Los autores declaran, que este trabajo fue desarrollado en el Departamento de Sistemas Nucleares del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al Departamento de Sistemas Nucleares del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo. Se agradece a los revisores, por su invaluable aportación en la culminación del presente trabajo.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] International Atomic Energy Agency, *Advances in Applications of Burnup Credit to Enhance Spent Fuel Transportation, Storage, Reprocessing and Disposition*, IAEA-TECDOC-1547, Vienna, Austria, 2005.
- [2] International Atomic Energy Agency, *Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel*, IAEA-TECDOC-1626, Vienna, Austria, 2009.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Status of Minor Actinide Fuel Development*, IAEA No. NF-T-4.6, Vienna, 2009.
- [4] D. Westlén, "Why Faster is Better - On Minor Actinide Transmutation in Hard Neutron Spectra," Ph.D. thesis, School of Engineering Sciences, Physics, KTH engineering science, Stockholm, Sweden, 2007. Available: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:11605/FULLTEXT01.pdf>
- [5] J. L. Francois, C. Martín-del-Campo, R. Francois, L. B. Morales, "A practical optimization procedure for radial BWR fuel lattice design using tabu search with a multiobjective function", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 30, no. 12, pp. 1213-1229, August 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-4549\(03\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4549(03)00055-0)
- [6] J.-L. Montes-Tadeo, R. Perusquía-del-Cueto, D. A. Pelta, J.-L. François, J.-J. Ortiz-Servin, C. Martín-del-Campo, A. Castillo, "A hybrid system for optimizing enrichment and gadolinia distributions in BWR fuel lattices", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 119, pp. 103-172, January 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2019.103172>
- [7] C., Martín-del-Campo, J. L., Francois, R., Carmona., I. P. Oropeza., "Optimization of BWR fuel lattice enrichment and gadolinia distribution using genetic algorithms and knowledge", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 248-253, April 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.12.008>
- [8] W. F. Sacco, N. Henderson, A.C. Rios-Coelho, M. M. Ali, C. Pereira, "Differential evolution algorithms applied to nuclear reactor core design", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 1093-1099, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.05.007>
- [9] E. Zio, G. Viadana, "Optimization of the inspection intervals of a safety system in a nuclear power plant by Multi-Objective Differential Evolution (MODE)", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 11, pp. 1552-1563, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.06.010>
- [10] T. Hielscher, S. A. Hadigheh, "Optimizing Memory-Efficient Multimodal Networks for Image Classification using Differential Evolution", *Applied Soft Computing*, vol. 171, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112714>
- [11] R. Zhong, A. G. Hussien, S. Zhang, Y. Xu, J. Yu, "Space mission trajectory optimization via competitive differential evolution with independent success history adaptation", *Applied Soft Computing*, vol. 171, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112777>
- [12] E. Martínez Caballero, "Análisis de la reducción de radiotoxicidad basado en el reciclado de actínidos", tesis de doctorado, física y matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2015.
- [13] E. Martinez, J. R. Ramirez, G. Alonso, "Actinides recycling assessment in a thermal reactor", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 79, pp. 51-60, May 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.01.014>
- [14] J. R. Ramirez, G. Alonso, E. Martinez, R. Castillo, J. C. Palacios, "Analysis of actinide recycling in a Boiling Water Reactor using CASMO-4/SIMULATE-3", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 89, pp. 26-38, May 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.02.003>
- [15] E. Martínez C., J. L. Montes-Tadeo, "Estudio del Contenido de Actínidos Menores en Celdas de Combustible BWR", *34 Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana. Reactores Modulares Pequeños, una nueva perspectiva para la Energía Nuclear en México*, La Paz, Baja California Sur, México, agosto, 2023.
- [16] Storn, R., Price, K., "Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no.4, pp.341-359, December 1997, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- [17] I. C. Gauld, O. W. Hermann, R. M. Westfall, *ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay, and Associated Radiation Source Terms*, Nuclear Sci. & Tech. Div., ORNL/TM-2005/39, ver. 6, vol. II, Sect. F7, Oak Ridge National Laboratory, USA, January, 2009.
- [18] L. M. Petrie, N. F. Landers, D. F. Hollenbach, B. T. Rearden, M. E. Dunn, S. Goluoglu, *KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program*, Nuclear Sci. & Tech. Div., ORNL/TM-2005/39, ver. 6, vol. II, Sect. F11, Oak Ridge National Laboratory, USA, January 2009.
- [19] Nuclear Energy Agency, *Actinide and fission product partitioning and transmutation*, Tenth Information Exchange Meeting, ISBN 978-92-64-99097-5, Organisation for Economic Co-operation and Development, Mito, Japan, 2008.
- [20] J. Rhodes, M. Edenius, *CASMO-4. A Fuel Assembly Burnup Program. User's Manual*. SSP-01/400 Rev 4. StudsvikScandpower, 2004.
- [21] J. L. Montes, J. L. François, J. J. Ortiz, C. Martín-del-Campo, R. Perusquía, "Fuel lattice design in a boiling water reactor using an ant-colony-based system", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 38, no. 6, pp. 1327-1338, ISSN 0306-4549, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.02.001>
- [22] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Learning Machine*, MA, USA: Addison-Wesley, 1989.

Diseño, simulación y construcción de una mesa de pruebas para medición de temperaturas en barras metálicas

Design, Simulation and Construction of a Test Table for Temperature Measurement in Metal Bars

Liliana **Gutiérrez Lonche**¹, Iván **González Uribe**², Madian Jabnel **Hernández Sánchez**³,
Danya Analí **Álvarez Suárez**⁴, Miguel Ángel **Valencia Saravia**⁵

Gobierno de la Ciudad de México, MÉXICO

¹ ORCID: 0009-0007-3980-219X | lilian_lonche@yahoo.com.mx

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, MÉXICO

² ORCID: 0009-0008-8435-1196 | igu@azc-uam.mx

³ ORCID: 0009-0009-7010-5266 | mdjhsa@gmail.com

⁴ ORCID: 0009-0000-5438-0772 | anali.sua11@gmail.com

⁵ ORCID: 0009-0001-3786-4633 | miguel.anvalencia92@gmail.com

Recibido 03/02/2025, aceptado 25/05/2025.

Resumen

El presente artículo reporta el diseño, construcción y simulación de una mesa para medición de temperaturas. El problema por el cual se presenta este trabajo es que la Universidad Autónoma Metropolitana no cuenta con un equipo adecuado que permita realizar mediciones de temperatura en barras. El equipo existente solo permite realizar experimentos a una temperatura menor de 50°C y tarda aproximadamente una hora en llegar a esta temperatura. Por lo cual, este equipo no resulta funcional, ya que, varias de las carreras ofrecidas en la universidad requieren realizar y determinar cómo se transmite el calor y la temperatura en elementos metálicos, de manera que los alumnos comprendan estos conceptos. Debido a esto, el objetivo de este trabajo es diseñar y construir un equipo completamente nuevo que permita hacer mediciones de temperaturas en barras a diferentes temperaturas. La condición principal a la cual estará sujeto este diseño es que la temperatura de operación no sobrepase los 700°C dentro de la cámara térmica y la cual pueda ser controlada para probar distintos materiales. Adicionalmente, se propuso como reto personal para los alumnos, que el costo por la fabricación del equipo no superara los \$3500.00. Bajo esta consideración se llegó a los siguientes resultados: el sistema de calefacción propuesto es mediante resistencias eléctricas, las cuales estarán sujetas y distribuidas en la cámara térmica para aprovechar al máximo el calor generado. Para realizar esto, fue necesario diseñar una cámara térmica que sea capaz de conservar el calor. Esto se logra con una adecuada selección de materiales refractantes y un análisis matemático de la transferencia de calor hacia los exteriores de la cámara utilizando la Ley de Fourier. Adicionalmente, se diseñará una estructura capaz de soportar el peso de los elementos de la cámara térmica. Por último, se realizó una simulación numérica la cual permitió comprobar y corroborar la distribución de temperaturas en la cámara térmica, de esta manera se puede validar el diseño propuesto y adicionalmente, utilizar los conocimientos aplicados en diversas materias como Simulación, Transferencia de Calor, Manufactura, entre otras.

Palabras clave: cámara térmica, construcción, diseño, mesa de medición de temperaturas, simulación numérica, temperaturas en barras.

Abstract

This article reports on the design, construction, and simulation of a temperature measuring table. The reason for this work is that the Autonomous Metropolitan University lacks adequate equipment for measuring temperature in bars. The existing equipment only allows experiments to be conducted at temperatures below 50°C and takes approximately one hour to reach this temperature. Therefore, this equipment is not functional, as several university courses require students to understand how heat and temperature transfer in metallic elements and these concepts. Therefore, the objective of this project is to design and build a completely new device that allows for temperature measurement in bars at different temperatures. The main requirement for this design is that the operating temperature inside the thermal chamber not exceed 700°C, allowing it to be controlled for testing different materials. Furthermore, the students were challenged to ensure that the manufacturing cost of the equipment would not exceed \$3,500.00. Based on this consideration, the following results were obtained: The proposed heating system uses electric resistors, which will be installed and distributed throughout the thermal chamber to maximize heat generation. To achieve this, it was necessary to design a thermal chamber capable of conserving heat. This is achieved through an appropriate selection of refractory materials and a mathematical analysis of heat transfer to the chamber exterior using Fourier's Law. In addition, a structure capable of supporting the weight of the thermal chamber elements will be designed. Finally, a numerical simulation was performed to verify and corroborate the temperature distribution in the thermal chamber. This allowed for the validation of the proposed design and the application of practical knowledge in various areas, such as simulation, heat transfer, manufacturing, and more.

Index terms: construction, design, numerical simulation, temperature measurement table, thermal camera, temperatures in bars.

I. INTRODUCCIÓN

El perfil de temperatura es un término usado para describir el proceso de registrar datos e interpretar las temperaturas de productos o aire a través de un proceso de tratamiento térmico, este proceso es esencial para la realización de análisis de transferencia de energía calorífica [1]. Una manera para obtener este perfil es a través del calentamiento de barras metálicas por medio de la transferencia de calor por convección. Este proceso es descrito como el intercambio de energía térmica que sucede cuando un fluido se pone en contacto con un sólido cuya superficie está a una temperatura distinta [1]. Para la obtención de un perfil de temperaturas adecuado, es necesario que la forma en la que se calienta el objeto de estudio se obtenga de manera uniforme y controlada [2]. Para ello, es necesario la creación de un sistema que permita elevar la temperatura de manera eficaz, sea seguro de usar y no involucre notables pérdidas de calor [3].

En el desarrollo de equipos de transferencia de calor es necesario realizar una correcta selección de materiales considerando sus propiedades térmicas [4]. Algunos autores argumentan que las formas de transferencia de calor son de gran relevancia dado que constituyen fundamentos científicos esenciales que pueden explicar una amplia gama de fenómenos térmicos [5]. Los cuales son aplicados a una gran parte de diseños orientados a la ingeniería, tales como el diseño de sistemas de refrigeración, calefacción, transferencia de calor, intercambiadores de calor, entre otros. El comportamiento termodinámico de los materiales resulta de vital importancia y una forma de determinar el cómo se comporta el material cuando es sometiendo a pruebas de conducción de calor [5]. Este último punto es de vital importancia y el cual se considerará en el trabajo.

Debido a lo anterior, el principal problema es que la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, no cuenta con un equipo funcional y de amplio rango de temperaturas para realizar mediciones adecuadas dentro de sus instalaciones. Esto se debe a que el equipo existente en la universidad difícilmente alcanza temperaturas de 50°C y lo logra en un periodo de tiempo demasiado prolongado llegando a ser hasta de una hora. Debido a esto, el objetivo principal de este trabajo es el de diseñar y construir un equipo que pueda alcanzar una temperatura de operación de 700°C en su interior y sin tener pérdidas de calor significativas al ambiente, además de ser de un bajo costo, no llegando a superar los \$3500 en materiales. Así mismo, se espera que el equipo pueda ser utilizado para calentar de manera uniforme los extremos de dos barras metálicas (véase Fig. 1) a las cuales posteriormente se les podrá realizar mediciones de temperatura por medio de una computadora. Cabe mencionar que este proyecto fue propuesto por los alumnos al cursar la UEA de Taller de Termofluidos, esto con dos objetivos que se marcan en el plan de estudios de la materia. El primero de ellos que los alumnos puedan diseñar, optimizar o implementar equipos o dispositivos en los cuales apliquen todos los conocimientos adquiridos en la carrera. Como segundo objetivo, se busca que los alumnos brinden algún producto o equipo útil a la universidad de manera que pueda ser utilizado por la institución en los diferentes cursos.

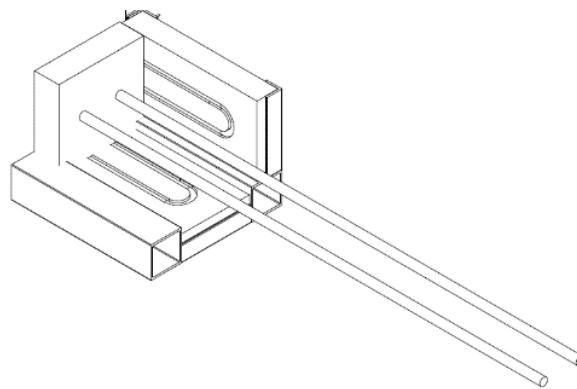


Fig. 1. Posición de las barras en la cámara térmica.

De esta manera, se diseñará el sistema de control con ayuda de un arduino y diferentes termopares, con los cuales se controlarán las temperaturas dentro del equipo y la medición en las barras. Para realizar esto, fue necesario diseñar una cámara térmica que sea capaz de conservar el calor. Esto se logra con una adecuada selección de materiales refractantes y un análisis matemático de la transferencia de calor hacia los exteriores de la cámara utilizando la Ley de Fourier.

Adicionalmente, se realizó la simulación de la transferencia de calor en el horno donde se compararon los resultados teóricos y numéricos con los cuales se validó el diseño del horno, obteniendo resultados similares. Este análisis involucra la simulación de transferencia de calor por conducción entre el tabique por una parte la zona caliente producidas por las resistencias y el ambiente exterior. De esta manera, se logró realizar un producto donde los alumnos puedan realizar mejores prácticas y comprendan de una mejor manera la influencia de la transferencia de calor en barras en un corto tiempo debido a que se contará con equipo especializado en este campo. Este equipo fue instalado en el Laboratorio de Termofluidos y el cual apoyara a las UEA de Mediciones en Ingeniería, Laboratorio de Termofluidos I y Laboratorio de Termofluidos II, Taller de Termofluidos, entre otras materias que son impartidas en la Unidad Azcapotzalco en el Departamento de Energía el cual es el segundo departamento más grande de la universidad y el cual ofrece sus laboratorios a la mayoría de las licenciaturas.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

El primer paso consiste en diseñar la cámara térmica, así como la selección del sistema de calentamiento. Para esto, se planteó el uso de resistencias eléctricas debido a los bajos costos, mantenimiento y adquisición de los materiales. Para el diseño de la cámara térmica es necesario conocer el comportamiento térmico de las paredes. La forma de determinar esto es mediante el uso de la ley de Fourier aplicada a una pared plana de espesor L (ecuación (1)) [6].

$$\dot{Q} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Donde $\dot{Q}$ es la rapidez de conducción de calor, k es la conductividad térmica del material, A el área perpendicular a la transferencia de calor y ΔT es la diferencia de temperatura en ambos lados de la pared [6]. En la Fig. 2 se puede observar la transferencia de calor que se presentara en la cámara térmica.

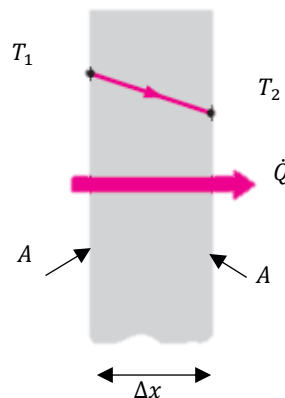


Fig. 2. Conducción de calor a través de una pared plana.

Para evitar pérdidas de calor importantes se debe de utilizar un material con conductividad térmica baja, siendo en este caso un material cerámico. El material elegido fue ladrillo rojo recocido que tiene una conductividad térmica de $0.69 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ y la resistencia seleccionada fue una resistencia tipo U (véase Fig. 3). Resistencia eléctrica tiene las siguientes especificaciones: marca “CASMAN LK”, Modelo “RES U de 120V 1000 WATTS conector de $\frac{1}{2}$ ”.

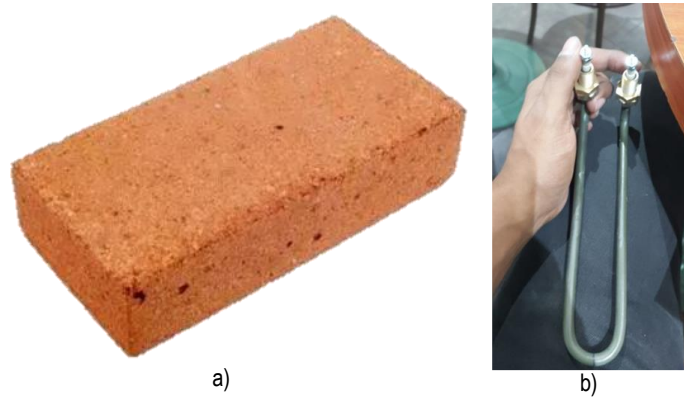


Fig. 3. Elementos para la cámara térmica: a) Tabique Rojo. b) Resistencia Tipo U.

Para fijar la resistencia al ladrillo se procedió a ranurar el tabique con la forma de la resistencia (véase Fig. 4). Una ventaja de utilizar el tabique rojo es que la porosidad del material sirve para proteger al ladrillo de una fractura debido a la temperatura que puede proporcionar la resistencia.

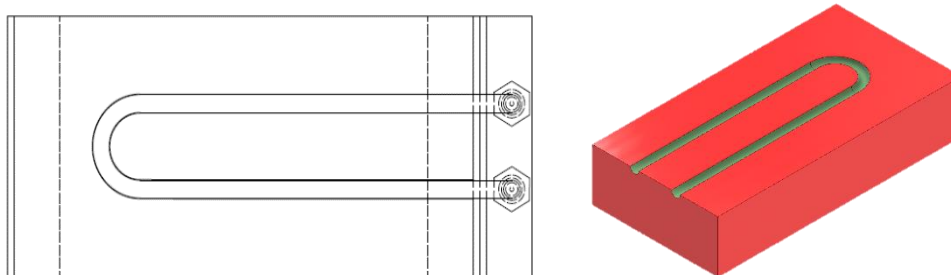


Fig. 4. Ranura en tabique con la forma de la resistencia.

Adicionalmente, se plantea que la temperatura máxima dentro de la cámara sea de 700°C . Esto se realizó con el fin de contar con un equipo que permita probar diversos materiales a altas temperaturas. De esta misma manera, se propone las dimensiones internas de la cámara con dimensiones de 22.30 cm de largo, 22.30 cm de ancho y 11.5 cm de profundidad. Esto con el propósito de concentrar el calor lo más cercano a las barras de calentamiento y de manera uniforme.

Para poder sujetar adecuadamente los ladrillos se planteó la construcción de una estructura con un perfil metálico conformado con ángulo y PTR de 2" (véase Fig. 5). Además, se propuso hacer una estructura externa con el fin de conservar el calor y al mismo tiempo prevenir el contacto de alguna persona con la cámara térmica. En la Fig. 6 se muestra el diseño final de la cámara térmica y su posicionamiento en la estructura exterior.

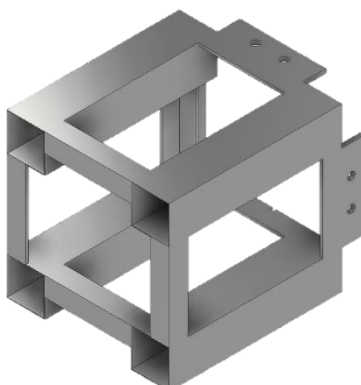


Fig. 5. Diseño del soporte de los ladrillos.

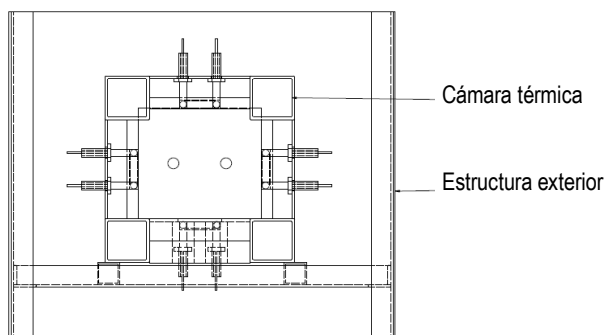


Fig. 6. Diseño final de la cámara térmica.

Una vez que se terminó el diseño de la cámara térmica, se procedió a realizar una base que soportará el peso de todo el sistema de calefacción y del otro lado se colocaría un pequeño cajón que contendría la parte física del sistema de control. La base será construida con perfil PTR de 2" (véase Fig. 7).

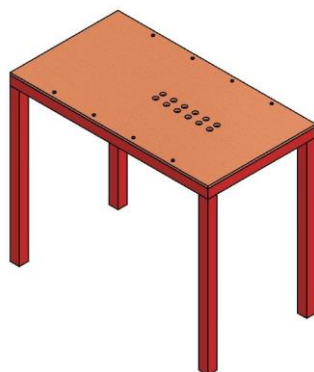


Fig. 7. Estructura para soportar horno.

Para la medición de las temperaturas, se colocaron 6 puntos de medición a cada una de las barras y en la mesa. Se barrenaron 2 barras, una de aluminio y otra de cobre con espaciamientos de 6 cm entre ellos después de la salida del horno. Adicionalmente, se colocaron termopares en los barrenos con el fin de obtener la medición de temperaturas. Para el sistema de control, se diseñó una interfaz controlada por computadora que permite

registrar los datos en una hoja de Excel donde se registran las temperaturas en intervalos de un minuto, pero en la programación del arduino se puede ajustar este tiempo a mediciones de lectura más cortas. De esta manera se utilizó un arduino modelo Mega 2560 debido al espacio de memoria que se requiere para el almacenamiento de los datos además de contar con las siguientes características funcionales para este trabajo: tiene 8 kB de SRAM, lo que permite crear y manipular más variables durante la ejecución, cuenta con cuatro UART de hardware para la comunicación serie TTL (5V), tiene un puerto de comunicación virtual al software del ordenador, cuenta con una biblioteca SoftwareSerial que permite la comunicación serie en cualquiera de los pines digitales.

6

Para el control de la temperatura interna en la cámara, se colocó un termopar, el cual mide la temperatura y mediante el sistema de control y un relevador de estado sólido el cual interrumpía el suministro de energía del sistema. En la Fig. 8 se puede observar el diseño final de la mesa de calentamiento de barras.

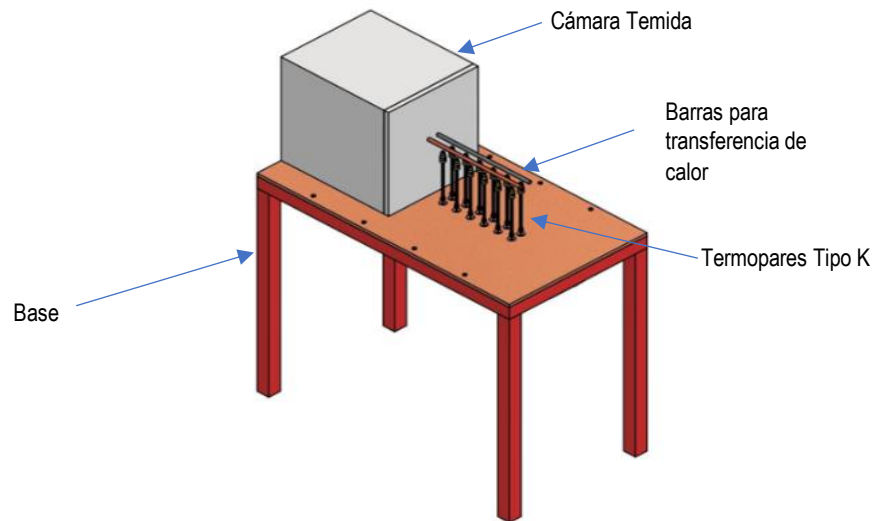


Fig. 8. Diseño final de la mesa de calentamiento de barras

Los termopares utilizados fueron el MAX6675 tipo K con capacidad de registrar temperaturas de hasta 1024°C con una resolución de 0.25°C. Para obtener la temperatura deseada, el dispositivo mide el voltaje de salida y la de un diodo que funciona como sensor de temperatura ambiente. Finalmente, el sistema transmite el voltaje del diodo y el voltaje del termopar hacia el convertidor analógico digital para calcular la temperatura que se desea obtener. Una vez que se ha establecido el diseño del sistema completo se procedió a realizar la simulación para comprobar el correcto funcionamiento de la cámara térmica, para esto se utilizó un programa de análisis por método de elemento finito para analizar la transferencia de calor a través de las paredes de ladrillo de dimensiones 3.5 × 11.5 × 22.3 cm.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados analíticos de la transferencia de calor dentro de la cámara se muestran a continuación. Para esto, se considera una sola cara de la cámara térmica con dimensiones de 22.30 cm × 11.5 cm y un espesor de ladrillo de 3.5 cm. Adicionalmente, la resistencia proporciona un calor de 280 W con lo cual la temperatura en el exterior fue:

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 - \frac{\dot{Q}L}{kA} \quad (3)$$

$$T_2 = 700^{\circ}\text{C} - \frac{280\text{W} * 0.035\text{m}}{0.69 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} * 0.025645\text{m}^2} = 146.17^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Esta es la temperatura que debe tener el ladrillo en el otro extremo de la cara que se encuentra a temperatura ambiente, este valor se comparará con simulación. Para esta, se consideró una temperatura máxima de 700°C que es lo que produce la resistencia al estar en contacto con el tabique. Se propuso un coeficiente de convección de $15 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, un valor típico para convección natural [7]. En la Fig. 9 se muestra el resultado de la simulación. El ladrillo resultó ser un buen material para la cámara térmica por su baja capacidad de conducción de calor, se puede observar que la temperatura en la cara exterior del ladrillo será aproximadamente menor a los 134°C .

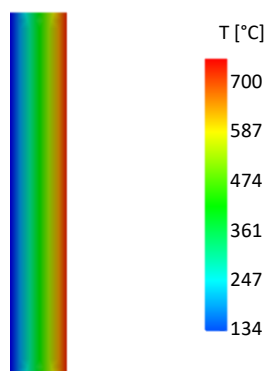


Fig. 9. Simulación de temperaturas en un ladrillo.

Corroborando los resultados anteriores se puede determinar que el diseño propuesto es adecuado. Para la estructura de la cámara térmica (véase Fig. 10) se muestra el ensamble de la estructura con los tabiques. En esta se puede apreciar que se rellenó los huecos con tabique para evitar pérdidas de calor en estas partes.



Fig. 10. Construcción final de la cámara térmica.

Para evitar que alguien pudiera salir dañado por los aumentos de temperatura, se diseñó una estructura que cubre la cámara térmica y la cual es recubierta con lámina y pintura de alta temperatura, como se muestra en la Fig. 11. Esta sección será removible en caso de requerir algún tipo de mantenimiento.

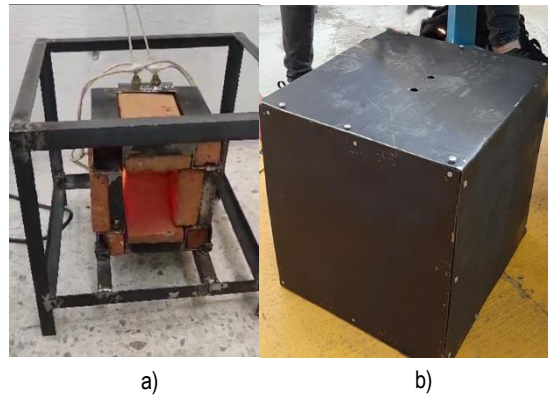


Fig. 11. Estructura final de la caja: a) sin lámina. b) con lámina.

Para el sistema de control se utilizó un arduino como microcontrolador, termopares para medir la temperatura en las barras y dentro de la cámara térmica y un relevador para controlar la temperatura. Después, se procedió a fabricar la base con PTR de 2", se adicionó una tabla para soportar a todos los elementos del horno como se muestra en la Fig. 12. En esta figura se aprecia la colocación de los termopares y el sistema de control por debajo de la mesa para evitar interferencias por parte de la temperatura.



Fig. 12. Estructura final del equipo.

El sistema de control del dispositivo queda como se muestra en la Fig. 13.

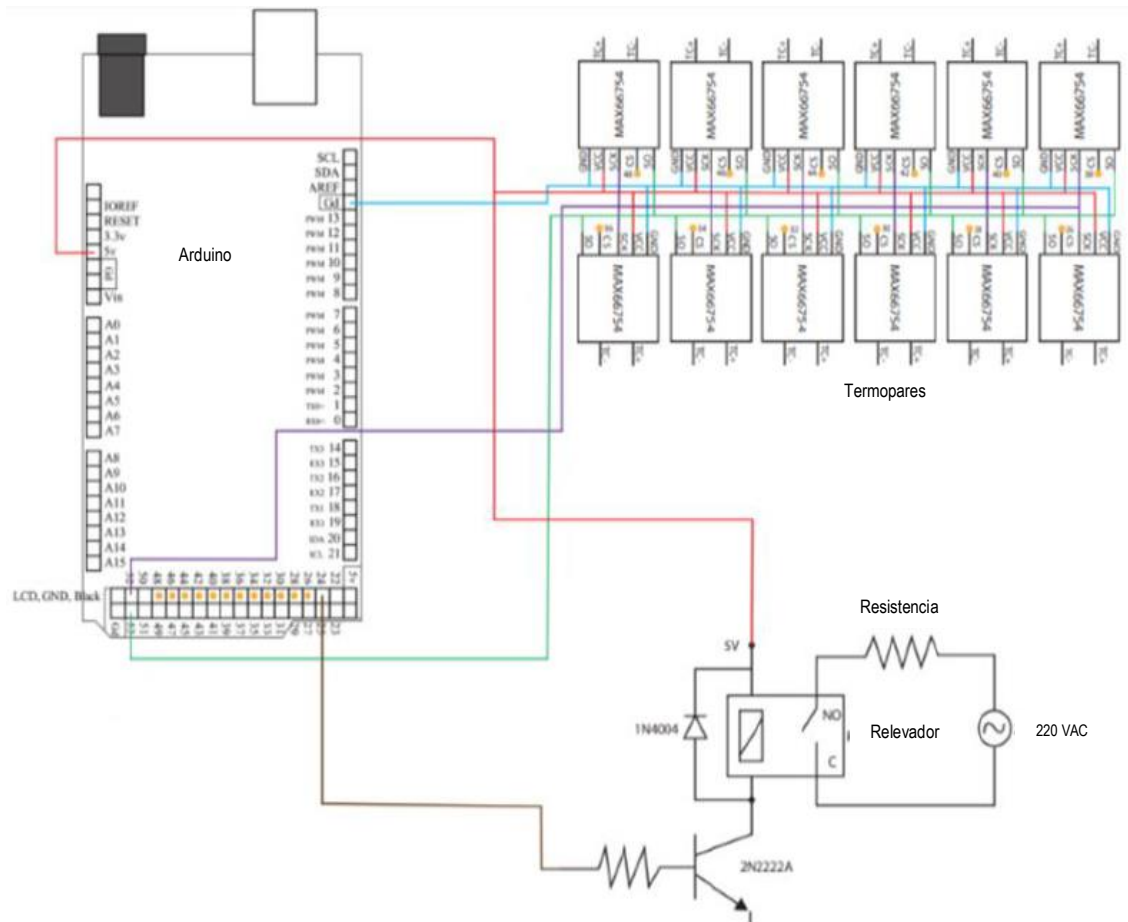


Fig. 13. Sistema de control.

Para la recopilación de datos se utiliza la combinación de la programación, los termopares como ya se había explicado anteriormente y todo esto es registrado en una hoja de Excel (véase Fig.14).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Entrada de datos (desde Arduino Mega 2560 (COM4))														
2	Los datos procedentes del origen de datos actual aparecerán abajo según se reciban.														
3	Datos actuales														
4	TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	
5	9:21:05.96	26	24	26	23	23	23	24	22	41	24	23	23	45	
6	Información histórica														
7	TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12	CH13	
8	9:20:51.82	27	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
9	9:20:52.83	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
10	9:20:53.84	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
11	9:20:54.85	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
12	9:20:55.86	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
13	9:20:56.87	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
14	9:20:57.88	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
15	9:20:58.89	26	24	26	23	23	24	24	22	42	24	23	23	45	
16	9:20:59.90	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
17	9:21:00.91	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
18	9:21:01.92	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
19	9:21:02.93	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
20	9:21:03.94	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
21	9:21:04.95	26	24	26	23	23	24	24	22	41	24	23	23	45	
22	9:21:05.96	26	24	26	23	23	24	22	41	24	23	23	45		◀ Más reciente

Fig. 15. Interconexión entre equipo de medición y computadora con el registro de datos al inicio de la prueba.

Adicionalmente, una vez que se terminó la construcción de la mesa de medición de temperaturas, se procedió a realizar una medición de temperaturas en el exterior de la cubierta. La temperatura alcanzada en esta llegó a ser de 40°C. Para realizar las mediciones de temperatura solamente se debe conectar la computadora al puerto USB con el que cuenta el sistema de control como se muestra en la Fig.15.



Fig. 15. Interconexión entre equipo de medición y computadora

IV. CONCLUSIONES

El diseño del horno para medición de temperaturas cumple con las funciones y necesidades planteadas en el trabajo. Esto se puede verificar al comparar la simulación numérica con los resultados teóricos siendo similares. La cámara térmica, durante las pruebas experimentales, logró alcanzar una temperatura de 700°C en menos de 10 minutos, dato resulta bastante ideal para que el proceso de calentamiento en las barras se puede llevar a cabo en un tiempo relativamente corto. Debido a la adecuada selección de materiales y a los cálculos analíticos, se puede determinar que el diseño propuesto es adecuado y permite almacenar la temperatura dentro de la cámara térmica con pérdidas mínimas de calor hacia el exterior. Debido a esto, la temperatura en el exterior de la misma llegue a 134°C en la simulación y de manera analítica tenga un valor de 146.17°C. Esto se debe a que las condiciones de operación del equipo varían con relación al sistema de control donde puede variar la temperatura en la cámara térmica de $\pm 15^\circ\text{C}$. Por lo que, los resultados son similares y permite validar el diseño. Esto se logra gracias a la implementación del sistema de control del equipo y a todos los elementos con los que está formado el sistema. Adicionalmente, al poder recopilar la información del calentamiento de las barras con la conexión de una computadora y una hoja de Excel permite poder determinar el comportamiento de la temperatura en el intervalo de tiempo que se necesite. Comparando con el equipo que cuenta la institución, el equipo actual presenta mejoras considerables al equipo, lo cual proporciona un beneficio a la UAM Azcapotzalco en las diversas UEA como Mediciones en Ingeniería, Transferencia de calor, Laboratorio de Termofluidos entre otras que se imparten en la unidad lo cual permitirá a los alumnos realizar prácticas de una manera más fácil, en menor tiempo, a temperaturas altas y permitirá probar diversos materiales según sean las necesidades de los grupos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma Metropolitana y al Departamento de Energía por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización: **LGL**; Metodología: **LGL**; Software: **DAAS, MAVS**; Investigación: **LGL, IGU, MJHS, DAAS, MAVS**; Redacción y preparación del borrador original: **LGL, MJHS, MAVS**; Redacción, revisión y edición: **LGL, IGU, MJHS, DAAS, MAVS**; Supervisión: **LGL**; Análisis formal: **LGL, IGU, MJHS, DAAS, MAVS**; Administración del proyecto: **LGL, IGU**; Adquisición de fondos: **IGU**.

Financiamiento: Los autores declaran que este trabajo fue desarrollado de forma académica.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen, por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo. Se agradece a los revisores, por su invaluable aportación en la culminación del presente trabajo.

Conflicto de interés: Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] Panana-Girio, A. E., “Diseño de un intercambiador de calor compacto de placas con aletas para fluidos gas - gas”, trabajo de investigación, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Callao, 2007.
- [2] Ramírez, J. R., Nava, F. D., Álvarez, C. M., Lagunas, L. M., Lescas, M. A. “Perfiles de temperatura en un horno ladrillero”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 3, no. 2, pp. 209-217, 2004.
- [3] Luján, M., Guzmán, D., “Diseño, Construcción y Evaluación de un Horno (MK3) para la Cocción de Ladrillos Artesanales”, *Acta Nova*, vol. 7, no. 2, pp. 165-193, 2015.
- [4] Peñaloza Pérez, J. L., Urgilés Remache, F. M., “Diseño y Construcción de un Intercambiador de Calor de Tubería Aletada para el Laboratorio de Térmicas de la Facultad de Mecánica”, Tesis de Licenciatura, 2010.
- [5] Marrugo-Carreazo, D., Guerrero-Gómez, G. y Gómez-Camperos, J., “Desarrollo de un instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperatura en hornos,” *Ingenio UPFSO*, vol. 8, no. 1, pp. 47-58, 2015.
- [6] Cengel, Y. A., Ghajar, A. J., *Transferencia de calor y masa*, McGraw-Hill Interamericana, 4ª ed, 2011.
- [7] Solid Works, 2011, “Dassault Systems-Transferencia de calor por convección”, available: https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Convection_Topics/Convection_Heat_Coefficient.htm?format=P&value=

Aprendizaje en modelos lineales multi-respuesta en altas dimensiones con búsqueda cuántica no oracular (cuando el rango de la matriz de coeficientes es conocido)

Learning in High-Dimensional Multi-response Linear Models with Quantum non-Oracular Search (when the range of the coefficient matrix is known)

Víctor Hugo Hernández Castillo

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, MÉXICO
ORCID: 0009-0004-5107-6918 | vichernancs@ciencias.unam.mx

Recibido 25/03/2025, aceptado 01/06/2025.

Resumen

El presente trabajo estudia *el modelo lineal multivariado de dimensión alta y rango bajo*, este nos proporciona información relevante de una muestra dada, con la ayuda de un *algoritmo de la computación cuántica híbrido* (combina la computación cuántica y clásica, para resolver un problema). El método estima cada una de las entradas de la matriz de coeficientes identificando las columnas linealmente independientes, además de estimar la matriz de errores. Daremos un ejemplo concreto cuando *el rango de la matriz de coeficientes es conocido*. Cuando el rango no es conocido, tenemos un problema NP-hard con solución. La obtención de la matriz de coeficientes se obtiene a través de un algoritmo de búsqueda cuántica no oracular (NQS, non oracular quantum search algorithm), vea [1], [2], en su etapa inicial se debe de realizar una búsqueda combinatoria sobre todos los posibles rangos, después de ello sobre todas las posibles distribuciones de las columnas linealmente independientes en la matriz.

En nuestra investigación realizamos parcialmente la ejecución del mencionado algoritmo cuántico, sin embargo, mostramos a detalle la parte crítica del mismo, que consiste en reducir a la función de pérdida L_n definida en [1], [2], a un *problema de optimización cuadrática multivariada*, además de optimizarla, esta etapa es un punto de partida para aplicar completamente el algoritmo. Mostramos una sola optimización de todas las que se deberán realizar a través de una búsqueda combinatoria especificada en [1], [2]. La última etapa del algoritmo NQS, consiste en elaborar una sucesión creciente a partir de los parámetros de cada optimización mencionadas sustituidos en la función de pérdida L_n , trabajo que está no incluido en este artículo y que corresponde a un problema NP-hard (cuando el rango de la matriz no es conocido). La comprensión de nuestro trabajo, permitirá a distintas áreas de estudio que posean datos multivariados reales poder realizar predicciones como la demografía, medicina, etc.

Palabras clave: modelo lineal multi-respuesta, análisis multivariado, algoritmo de la computación cuántica.

Abstract

This paper studies *the high-dimensional, low-rank multivariate linear model*, which provides us with relevant information given a sample, with the help of a *hybrid quantum computing algorithm* (combining quantum and classical computing to solve a problem). The method estimates each of the entries of the coefficient matrix by identifying the linearly independent columns, in addition to estimating the error matrix. We will give a concrete example when *the rank of the coefficient matrix is known*. When the rank is unknown, we have a NP-hard problem with solution. The coefficient matrix is obtained through of a non-oracular quantum search algorithm (NQS), see [1],[2], in its initial stage, a combinatorial search must be performed on all possible ranks, then on all possible distributions of the linearly independent columns in the matrix.

In our research we partially perform the execution of the mentioned quantum algorithm, however, we show in detail the critical part of it, which consists in reducing the loss function L_n defined in [1], [2], to a *multivariate quadratic optimization problem*, furthermore optimizing it, this stage is a starting point for the full implementation of the algorithm. We show only one optimization of all those to be performed through a combinatorial search specified in [1], [2]. The last stage of the NQS algorithm consists in elaborating an increasing sequence from the parameters of each optimization substituted in the loss function L_n , work which is not included in this article and which corresponds to an NP-hard problem (when the rank of the matrix is unknown). The understanding of our work will allow different areas of study with real multivariate data to make predictions such as demography, medicine, etc.

Keywords: linear multi-response model, multivariate analysis, quantum computing algorithm.

I. INTRODUCCIÓN

Una aproximación usada comúnmente para el tratado en los modelos lineales multivariado de dimension alta y rango bajo, se basa en la descomposición de la matriz de coeficientes $\mathbf{A}$, la cual supongamos que tiene tamaño $p \times q$ con rango r , por ejemplo, de acuerdo al método de descomposición en valores singulares [5], $\mathbf{A}$ se puede descomponer como la multiplicación $\mathbf{CDQ}$, donde $\mathbf{C}$ es una matriz de tamaño $p \times \hat{r}$, $\mathbf{Q}$ es una matriz de tamaño $\hat{r} \times q$ y $\mathbf{D}$ es una matriz diagonal de tamaño $\hat{r}$, donde $\hat{r}$ es un estimador de r . De acuerdo al enfoque utilizado para poder estimar a r , se pueden producir distintos estimadores $\hat{r}$, vea [2], [11]. Estos poseen buenas propiedades asintóticas, sin embargo, cuando no se cumple el supuesto de rango bajo, uno se encuentra con el dilema de crear parámetros desconocidos, para estimar a su vez parámetros desconocidos, lo que implica que la estimación de $\mathbf{C}$, $\mathbf{Q}$, y $\mathbf{D}$ envuelve al menos $(p+q)r$ parámetros desconocidos, que son más que los parámetros desconocidos en $\mathbf{A}$, es decir, $pr + rq = (p+q)r > pq$, vea [1],[2]. Una nueva línea de estudio en [1],[2] proponen estimar tanto a r como a la matriz de coeficientes $\mathbf{A}$ sin el método de descomposición. La intuición es representar a la matriz de coeficiente $\mathbf{A}$ a través de dos tipos de columnas, el primer tipo son las columnas linealmente independientes cuyo número es igual al rango r y el segundo tipo de columnas, si es que existen, se forman como una combinación lineal de las columnas linealmente independientes mencionadas. Estadísticamente este nuevo proceso de aprendizaje es más eficiente que el enfoque de mínimos cuadrados y los enfoques basados en la descomposición, ya que solo se necesitan estimar $(p+q)r - r^2$ parámetros que son menores o iguales a pq , es decir, $(p+q)r - r^2 \leq pq$, desigualdad que se obtiene con mayor claridad a partir de una de las hipótesis del método propuesto en [1],[2], a saber $r \leq p < q$.

Nuestra contribución en el presente artículo recide en haber modelado un ejemplo concreto para el cálculo de la matriz de coeficientes $\hat{\mathbf{A}}$, un estimador de la matriz $\mathbf{A}$, el cual muestra una de las predicciones citadas en [1], [2], a saber que $\hat{\mathbf{A}}$ es una aproximación muy cercana a $\mathbf{A}$. Con este cálculo comprendimos que $\hat{\mathbf{A}}$ representa una optimización de una sola instancia de la función de pérdida L_n presente en [1],[2], y que definimos abajo. Este cálculo a su vez nos hizo comprender que L_n modela un problema NP-hard (una clase de problemas computacionales que son al menos tan difíciles, como los problemas más difíciles en complejidad de la clase NP, la clase de problemas que pueden ser resueltos por algoritmos de tiempo polinomial no determinista,[8]). La obtención de $\hat{\mathbf{A}}$ (explicada a detalla abajo), requiere identificar su rango (que en este caso lo conocemos por hipótesis), la distribución de sus columnas linealmente independientes en $\hat{\mathbf{A}}$, la muestra multivariada, el valor de las columnas linealmente independientes (obtenidas a través de optimizar L_n) y el valor de los coeficientes que forman las combinaciones lineales que a su vez construyen las restantes columnas linealmente dependientes (obtenidos a través de optimizar L_n), en caso de existir. Las limitaciones de nuestro trabajo reciden en el hecho de tan solo representar una instancia de L_n , ya que como comentamos arriba, L_n modela es un problema NP-hard, así que resulta muy difícil plasmar en un artículo, todos los cálculos para explicarlo, sin embargo, hemos sentamos las bases para dar un ejemplo concreto de un problema NP-hard, en algún estudio posterior. Otra aportación de nuestro trabajo es que mejoramos definición de L_n al definirla más clara de entender, con respecto a las definiciones en [1],[2], al incluir en su argumento, cada uno de los parámetros que la definen, en orden.

La ventaja del algoritmo NQS sobre los algoritmos de búsqueda de computadoras electrónicas, se menciona en la siguiente información presente en [1], [2]. Para una búsqueda combinatoria sobre $D = 2^q$ modelos, un algoritmo de computación eléctrica requiere de $O(D)$ consultas para encontrar el modelo objetivo, por ejemplo, la obtención del estimador $\hat{\mathbf{A}}$ es un ejemplo de una consulta, que al explorar todos los posibles estimadores, elegiríamos el mejor de ellos en cuando al rango, de acuerdo a un criterio aclarado en [2], a saber el Criterio de Información Bayesiana (BIC, Bayesian Information Criterion), por otra parte, el algoritmo NQS requiere de $O(\log_2 D)$ iteraciones para converger con una alta probabilidad a los parámetros que nos producen el modelo objetivo.

II. MODELO Y MÉTODO DE ESTIMACIÓN

Establecemos las notaciones que utilizaremos en cada uno de los elementos que conforman el modelo lineal multi-respuesta propuesto en el artículo, "*Learning High Dimensional Multi-response Linear Models with Non-oracular Quantum Search*" [1].

Usamos $\mathbf{Y}$ para denotar al vector de todas las variables respuesta, $\mathbf{X}$ el vector de todas las covariables, así que de ahora en adelante, sin ninguna confusión, llamamos a $\mathbf{Y}$ la variable respuesta, a $\mathbf{X}$ la covariable. Asumimos que $\mathbf{Y}$ es de dimensión $q \times 1$, $\mathbf{X}$ es de dimensión $p \times 1$. Tanto p como q pueden tender a ∞ , cuando el tamaño de la muestra tiende a ∞ . El modelo lineal multivariado de dimensión alta y rango bajo que se aborda en [1], [2], [7] es

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}^\top \mathbf{X} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

donde $\mathbf{A}$ es una matriz desconocida de tamaño $p \times q$, de rango desconocido r , con $r \leq q < p$, $\boldsymbol{\epsilon} = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_q)^\top$ es un error aleatorio de dimensión $q \times 1$, junto con las siguientes condiciones

$$\mathbb{E}(\boldsymbol{\epsilon} | \mathbf{X}) = \mathbf{0}, \quad \text{cov}(\boldsymbol{\epsilon} | \mathbf{X}) = \boldsymbol{\Sigma}$$

asumimos que $\boldsymbol{\Sigma} = \sigma^2 \mathbf{I}_q$, con σ^2 desconocido.

Cada una de las columnas de la matriz $\mathbf{A}$ puede ser escrita como una combinación lineal de las r columnas que son linealmente independientes de $\mathbf{A}$. Esta observación motiva la estimación de $\mathbf{A}$ y r , recuperando las columnas linealmente independientes. A continuación explicamos el método de estimación para $\mathbf{A}$ propuesto en el documento [1], en la sección II, "Model and Estimation Method", para el caso cuando r , el rango de la matriz, es conocido. Se muestran cada uno de los conceptos asociados al método, para posteriormente pasemos a mostrar un ejemplo concreto. Se presenta el método de estimación de $\mathbf{A}$, de acuerdo con [1], [2].

Sea $\{\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i\}$, $i = 1, \dots, n$, una muestra tomada de $\{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\}$, con $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})^\top$ y $\mathbf{Y}_i = (y_{i1}, \dots, y_{iq})^\top$. Los autores proponen la estimación de $\mathbf{A}$ a través de minimizar la siguiente relación:

$$\begin{aligned} & L_n(r; j_1, \dots, j_r, \mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n, \mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_n, \mathbf{a}_{j_1}, \dots, \mathbf{a}_{j_r}, b_{k1}, \dots, b_{kr}) \\ &= \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{l=1}^r (y_{ij_l} - \mathbf{X}_i^\top \mathbf{a}_{j_l})^2 + \sum_{k \notin \{j_1, \dots, j_r\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^\top \sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l})^2 \right\} + \sum_{l=1}^r P_\lambda(\|\mathbf{a}_{j_l}\|) \end{aligned} \quad (2)$$

con respecto a $\mathbf{a}_{j_l}$'s, b_{kl} 's y $\{j_1, \dots, j_r\}$, donde $1 \leq j_1 < \dots < j_r \leq q$. Donde r es el rango de la matriz a estimar $\hat{\mathbf{A}}$, j_l representa l -ésima columna linealmente independiente en $\hat{\mathbf{A}}$ con $1 \leq l \leq r$, $\mathbf{a}_{j_l}$ es el vector columna linealmente independiente que forma $\hat{\mathbf{A}}$ y b_{kl} son los coeficientes que forman las combinaciones lineales tomando a los vectores $\mathbf{a}_{j_l}$'s, los coeficientes que contruyen las columnas linealmente dependientes, en caso de existir, es decir, $\sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l}$. La colección de estos estimadores por columnas, denotado como $\hat{\mathbf{A}}$, nos da el estimador de $\mathbf{A}$.

En el siguiente párrafo presentamos las mismas definiciones tomadas de [1].

Para $l \in \{1, \dots, \hat{r}\}$, $\hat{r}$ denota el minimizador de (2), $\hat{\mathcal{D}} = \{\hat{j}_1, \dots, \hat{j}_{\hat{r}}\}$, $\hat{\mathbf{a}}_{j_l}$, $j \in \hat{\mathcal{D}}$ y $\hat{b}_{kl}$, $k \in \hat{\mathcal{D}}^c$, con $\hat{\mathcal{D}}^c$ el complemento de $\hat{\mathcal{D}}$. Entonces la j -ésima columna de $\mathbf{A}$ es estimada por $\hat{\mathbf{a}}_j$, si $j \in \hat{\mathcal{D}}$ o

$\sum_{l=1}^r \hat{b}_{kl} \hat{a}_{jl}$, if $j \in \hat{\mathcal{D}}^c$. La colección de estos estimadores por columnas, denotado como $\hat{\mathbf{A}}$, nos da el estimador de $\mathbf{A}$.

Cuando r y $\{j_1, \dots, j_r\}$ están fijos, la minimización de L_n es un problema de optimización cuadrática el cual ha sido estudiado en [1], [2]. Sin embargo, la minimización de L_n con respecto a r y $\{j_1, \dots, j_r\}$ es no convexa y envuelve una búsqueda combinatoria sobre $\sum_{r=1}^q \binom{q}{r} = 2^q - 1$ opciones. Sin una relajación convexa o una aproximación por etapas, la optimización es computacionalmente equivalente a un problema NP-hard (una clase de problemas computacionales que son al menos tan difíciles como los problemas más difíciles en complejidad de la clase NP, la clase de problemas que pueden ser resueltos por algoritmos de tiempo polinomial no deterministas, [8]). La regresión lineal multivariada tiene por objetivo minimizar la función de pérdida L_n citada en la ecuación (2), en nuestro caso lo hacemos aplicando iteradamente el método de la gradiente descendente (por ejemplo, ya que hay varios métodos), que provoca en cada iteración se vaya aproximando a los valores de los parámetros que minimizan a L_n , incluso en algunos casos, los parámetros (coeficientes) llevan a L_n a cero, el mínimo absoluto de la función, ya que la misma es no negativa [7], [9]. A continuación, mostramos un diagrama de flujo del método (véase Fig. 1).

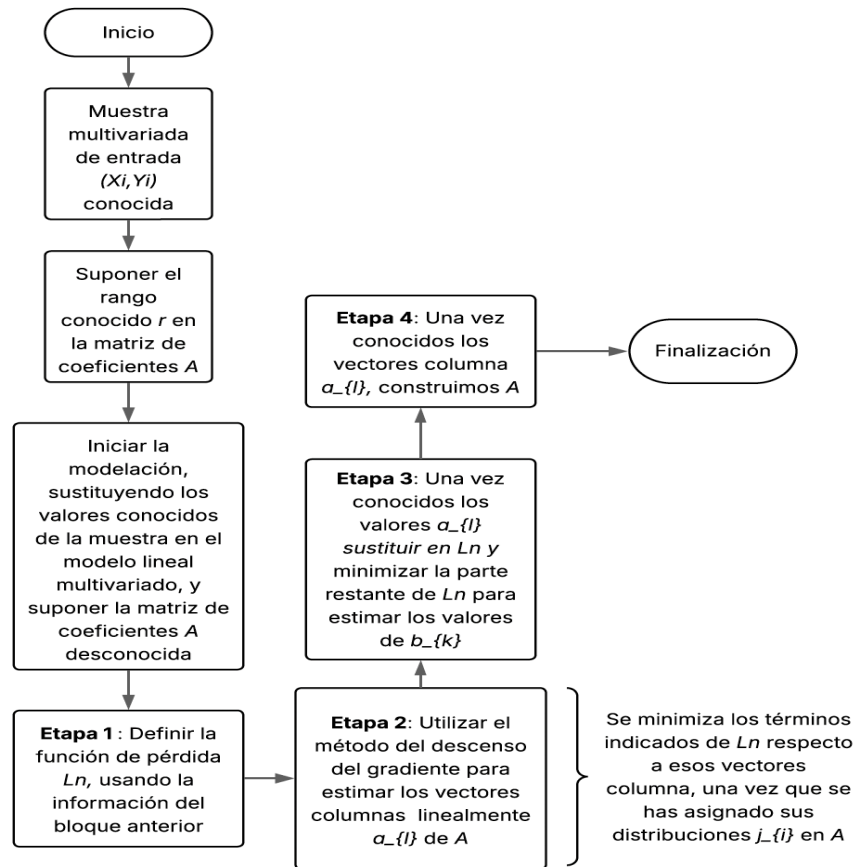


Fig. 1. Diagrama de flujo para la optimización de la función de pérdida L_n .

III. RANGO r DE LA MATRIZ $\hat{\mathbf{A}}$ ES CONOCIDO

En el siguiente ejemplo ejecutaremos al algoritmo sugerido por los autores de [1], [2], para el caso cuando el rango r de la matriz $\hat{\mathbf{A}}$ es conocido. Explicaremos a detalle cada uno de los pasos realizados para conseguir el objetivo de encontrar los valores de las entradas que conforman a la matriz en cuestión. Hacemos notar que el ejemplo que presentaremos a continuación es un "problema de optimización cuadrática multivariada", resuelto con ayuda de un algoritmo de la computación cuántica [3], [4], [6], [10] en el siguiente ejemplo concreto.

Ejemplo 1.1. Considere una muestra $\{\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i\}$, $i=1,2$, tomada de $\{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\}$, con los valores de $\mathbf{X}_i$ y $\mathbf{Y}_i$ definidos a continuación:

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2\} \text{ y } \mathbf{Y} = \{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2\}$$

Donde

$$\mathbf{X}_1 = \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix}_{5 \times 1}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix}_{5 \times 1}$$

y

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix}_{4 \times 1}, \quad \mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix}_{4 \times 1}$$

la matriz $\hat{\mathbf{A}}^T$ de tamaño 4×5 , que resuelve la modelación de la muestra usando el modelo lineal multivariado y el método propuesto por el artículo [1], es:

$$\hat{\mathbf{A}}^T = \begin{pmatrix} 7.977 & 5.751 & -1.960 & 10.636 & 12.387 \\ -0.668 & 3.820 & 2.875 & 5.834 & 5.655 \\ -5.134 & 5.510 & -3.762 & 2.817 & 4.327 \\ -19.082 & 34.608 & -0.339 & 34.631 & 38.952 \end{pmatrix}_{4 \times 5} \quad (3)$$

la cual relaciona a $\mathbf{X}_i$ con $\mathbf{Y}_i$, $i = 1,2$, a través de las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{Y}_i = \hat{\mathbf{A}}^T \mathbf{X}_i + \boldsymbol{\epsilon}_i$$

de acuerdo a los cálculos realizados en RStudio utilizando el método sugerido, se obtiene:

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.977 & 5.751 & -1.960 & 10.636 & 12.387 \\ -0.668 & 3.820 & 2.875 & 5.834 & 5.655 \\ -5.134 & 5.510 & -3.762 & 2.817 & 4.327 \\ -19.082 & 34.608 & -0.339 & 34.631 & 38.952 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.001 \\ 0.001 \\ -0.001 \\ 0.000 \end{pmatrix} \quad (4)$$

y

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7.977 & 5.751 & -1.960 & 10.636 & 12.387 \\ -0.668 & 3.820 & 2.875 & 5.834 & 5.655 \\ -5.134 & 5.510 & -3.762 & 2.817 & 4.327 \\ -19.082 & 34.608 & -0.339 & 34.631 & 38.952 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.005 \\ -0.003 \\ 0.001 \\ 0.000 \end{pmatrix} \quad (5)$$

es decir

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 43.999 \\ 22.999 \\ -25.999 \\ 15.000 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.001 \\ 0.001 \\ -0.001 \\ 0.000 \end{pmatrix}$$

y

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 62.995 \\ 11.003 \\ 17.999 \\ 110 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.005 \\ -0.003 \\ 0.001 \\ 0.000 \end{pmatrix}$$

Observe que la matriz $\hat{\mathbf{A}}^T$ definida en la ecuación (3), es una pequeña rotación de la matriz $\mathbf{A}^T$ definida a continuación:

$$\mathbf{A}^T = \begin{pmatrix} 8 & 6 & -2 & 11 & 12 \\ -1 & 4 & 3 & 6 & 6 \\ -5 & 5 & -4 & 3 & 4 \\ -20 & 35 & 0 & 35 & 40 \end{pmatrix} \quad (6)$$

que produce cálculos muy aproximados a los que se encuentran en las ecuaciones (4) y (5). En concreto la matriz $\mathbf{A}^T$ ha producido los datos de manera artificial que nos ayudarán a comprobar el método propuesto en [1].

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 & 6 & -2 & 11 & 12 \\ -1 & 4 & 3 & 6 & 6 \\ -5 & 5 & -4 & 3 & 4 \\ -20 & 35 & 0 & 35 & 40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

y

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 8 & 6 & -2 & 11 & 12 \\ -1 & 4 & 3 & 6 & 6 \\ -5 & 5 & -4 & 3 & 4 \\ -20 & 35 & 0 & 35 & 40 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

una vez establecido un preámbulo de los resultados (la obtención de la matriz $\hat{\mathbf{A}}^T$ que en este ejemplo tiene 20 entradas), iniciamos enlistando los pasos generales a seguir, para la aplicación del método sugerido por los doctores Jinyang Chen, Yuan Ke y Cheolwoo Park en [1], para el caso cuando r , el rango de la matriz $\mathbf{A}$ es conocido:

Etapla 1: Modelar la muestra de acuerdo al modelo lineal multivariado propuesto en la ecuación (1). Ello incluye la necesidad de modelar todas aquellas incógnitas involucradas en el modelo, hacer uso adecuado de las suposiciones que propone el método, además de tener muy presente cada uno de los parámetros que se obtienen de la muestra, los cuales definen una instancia de la ecuación (2).

Etapla 2: Una vez definida una instancia de la ecuación (2), se han fijado al rango r y al conjunto $\{j_1, \dots, j_r\}$, con estas condiciones iniciales, se minimiza la parte de la función definida en la ecuación (2), que a continuación citamos

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{l=1}^r (y_{ij_l} - \mathbf{X}_i^T \mathbf{a}_{j_l})^2 \right\} + \sum_{l=1}^r P_\lambda(\|\mathbf{a}_{j_l}\|) \quad (7)$$

7

En nuestro caso hemos elegido el *método del descenso del gradiente*, para minimizar los términos indicados en (7), sobre el método sugerido en [2] (estimación estándar por mínimos cuadrados penalizados), ya que los mismos autores enfatizan la no unicidad, del método de minimización seleccionado para (7), con respecto de las $\mathbf{a}_{j_l}$'s. Una vez encontradas las $\mathbf{a}_{j_l}$'s que minimicen el término izquierdo de (7), las definiremos como $\mathbf{a}_{j_l}^{(0)}$'s, es claro que la definición de la función de penalización P_λ , influye en la minimización.

Etapla 3: Debemos minimizar la siguiente expresión

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{k \notin \{j_1, \dots, j_r\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^T \sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l}^{(0)})^2 \right\} \quad (8)$$

con respecto a b_{kl} y denotaremos como $b_{kl}^{(0)}$'s aquellos valores que minimicen a (8).

Etapla 4: Considere a $\mathbf{a}_{j_l}^{(0)}$'s y $b_{kl}^{(0)}$'s como valores iniciales y minimice (2). Para definir los términos de la iteración, definimos a $\mathbf{a}_{j_l}^{(i)}$'s y $b_{kl}^{(i)}$'s como las $\mathbf{a}_{j_l}$'s y b_{kl} 's obtenidas en la i -ésima iteración. Continúe la iteración hasta la convergencia, el límite de las $\mathbf{a}_{j_l}$'s y b_{kl} 's es el minimizador de (2). Una vez conocidos todos los valores de $\mathbf{a}_{j_l}^{(0)}$'s construimos la matriz $\hat{\mathbf{A}}$ de acuerdo con la distribución asignada de cada uno distinguiendo entre los que son linealmente independientes y los que son linealmente dependientes.

Comenzamos con la explicación detallada de cada una de las etapas.

Etapla 1

La matriz $\mathbf{A}$ que relaciona a los vectores $\mathbf{X}_i$ de tamaño 5×1 , con los vectores $\mathbf{Y}_i$ de tamaño 4×1 , para $i = 1, 2$ respectivamente, a través del modelo lineal multivariado en la ecuación (1), está dada por:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} \end{pmatrix}_{5 \times 4} \quad (9)$$

supongamos que el rango de $\mathbf{A}$ es conocido. Sea $r = 3$ el rango de la matriz $\mathbf{A}$ en (9), así que el modelo lineal multivariado para la muestra dada, que las relaciona respectivamente, está dado por:

$$\mathbf{Y}_1 = \begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} & a_{51} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{42} & a_{52} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{43} & a_{53} \\ a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} & a_{54} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ -1 \\ 4 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{14} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{X}_1 + \boldsymbol{\epsilon}_1$$

y

$$\mathbf{Y}_2 = \begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} & a_{51} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{42} & a_{52} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{43} & a_{53} \\ a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} & a_{54} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \\ 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{21} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{23} \\ \epsilon_{24} \end{pmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{X}_2 + \boldsymbol{\epsilon}_2$$

o bien, en su forma más simple

$$\begin{pmatrix} 44 \\ 23 \\ -26 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3a_{11} - a_{21} + 4a_{31} + 2a_{41} + a_{51} + \epsilon_{11} \\ 3a_{12} - a_{22} + 4a_{32} + 2a_{42} + a_{52} + \epsilon_{12} \\ 3a_{13} - a_{23} + 4a_{33} + 2a_{43} + a_{53} + \epsilon_{13} \\ 3a_{14} - a_{24} + 4a_{34} + 2a_{44} + a_{54} + \epsilon_{14} \end{pmatrix}$$

y

$$\begin{pmatrix} 63 \\ 11 \\ 18 \\ 110 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2a_{11} + a_{21} - 3a_{31} + a_{41} + 2a_{51} + \epsilon_{21} \\ 2a_{12} + a_{22} - 3a_{32} + a_{42} + 2a_{52} + \epsilon_{22} \\ 2a_{13} + a_{23} - 3a_{33} + a_{43} + 2a_{53} + \epsilon_{23} \\ 2a_{14} + a_{24} - 3a_{34} + a_{44} + 2a_{54} + \epsilon_{24} \end{pmatrix}$$

ahora pasamos a la definición del conjunto

$$\{j_1, j_2, \dots, j_r\}$$

de acuerdo con la información tanto de la muestra, como de la suposición relacionada con el rango de la matriz $\mathbf{A}$, los valores de los parámetros p y r , son $p = 5$ de acuerdo a la información de la muestra y $r = 3$ de acuerdo a la suposición inicial.

Sean $j_1 = 1$, $j_2 = 2$ y $j_3 = 3$, lo que significa en el método, que por una parte j_i , con $1 \leq i \leq 3$, representa la i -ésima columna linealmente independientes de la matriz $\mathbf{A}$ así que al establecer $j_1 = 1$ se indica que el primer vector linealmente independiente de la matriz $\mathbf{A}$ se encuentra en la primera columna de la misma, $j_2 = 2$ se indica que el segundo vector linealmente independiente de la matriz $\mathbf{A}$ se encuentra en la segunda columna de la misma, y como es de esperar, $j_3 = 3$ se indica que el tercer vector linealmente independiente de la matriz $\mathbf{A}$ se encuentra en la tercera columna de la misma. Así que:

$$\mathcal{D}_r = \{j_1, j_2, \dots, j_r\} = \{j_1, j_2, j_3\} = \{1, 2, 3\}$$

Ahora elegimos la función de penalización que no penaliza a ninguna columna de la matriz de rango completo $\mathbf{A}_{\mathcal{D}_r}$, la submatriz de $\mathbf{A}$ de rango 3 formada por los 3 vectores linealmente independientes $\mathbf{a}_{j_l}$ la definimos a continuación:

$$\mathbf{A}_{\mathcal{D}_r} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \end{pmatrix}_{5 \times 3} \quad (10)$$

de (10) es claro que $\mathbf{a}_{j_l}$ con $1 \leq l \leq 3$, es alguna de las 3 columnas de la submatriz $\mathbf{A}_{\mathcal{D}_r}$.

Definimos a la función de penalización que no penaliza a ninguna columna de $\mathbf{A}_{\mathcal{D}_r}$ a continuación:

$$P_\lambda(\|\mathbf{a}_{j_l}\|) = 0, \quad \forall 1 \leq l \leq 3, \quad \text{por tanto,} \quad \sum_{l=1}^3 P_\lambda(\|\mathbf{a}_{j_l}\|) = 0$$

en este punto tenemos la información completa de todos los parámetros que posee la muestra y que a su vez define una instancia de la ecuación (2), como se observa en (11).

$$\begin{aligned} & L_n(3; j_1, j_2, j_3, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \mathbf{a}_{j_1}, \mathbf{a}_{j_2}, \mathbf{a}_{j_3}, b_{41}, b_{42}, b_{43}) \\ &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{l=1}^3 (y_{ij_l} - \mathbf{X}_i^\top \mathbf{a}_{j_l})^2 + \sum_{k=4 \notin \{j_1=1, j_2=2, j_3=3\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^\top \sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l})^2 \right\} + \sum_{l=1}^3 P_\lambda(\|\mathbf{a}_{j_l}\|) \\ &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \sum_{l=1}^3 (y_{ij_l} - \mathbf{X}_i^\top \mathbf{a}_{j_l})^2 + \sum_{k=4 \notin \{j_1=1, j_2=2, j_3=3\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^\top \sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l})^2 \right\} \quad (11) \\ &= (44 - (3a_{11} - a_{21} + 4a_{31} + 2a_{41} + a_{51}))^2 - - - (11.1) \\ &\quad + (23 - (3a_{12} - a_{22} + 4a_{32} + 2a_{42} + a_{52}))^2 - - - (11.2) \\ &\quad + (-26 - (3a_{13} - a_{23} + 4a_{33} + 2a_{43} + a_{53}))^2 - - - (11.3) \\ &\quad + (63 - (2a_{11} + a_{21} - 3a_{31} + a_{41} + 2a_{51}))^2 - - - (11.4) \\ &\quad + (11 - (2a_{12} + a_{22} - 3a_{32} + a_{42} + 2a_{52}))^2 - - - (11.5) \\ &\quad + (18 - (2a_{13} + a_{23} - 3a_{33} + a_{43} + 2a_{53}))^2 - - - (11.6) \\ &\quad + \sum_{i=1}^2 \sum_{k=4 \notin \{j_1=1, j_2=2, j_3=3\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^\top \sum_{l=1}^r b_{kl} \mathbf{a}_{j_l})^2 - - - (11.7) \end{aligned}$$

Se ha terminado con la etapa 1, ahora pasaremos a los cálculos en RStudio que llevan a cabo el método de aproximación elegido para obtener un mínimo local de la expresión matemática en (11).

Etapa 2

En esta etapa buscaremos minimizar a la expresión (11), que en parte está de manera explícita en los términos del (11.1) al (11.6). Es decir, deberemos de encontrar los valores de a_{ij} con $1 \leq i \leq 5$ y $1 \leq j \leq 4$ que minimicen los términos del (11.1) al (11.6). Como lo habíamos mencionado anteriormente, utilizaremos el *método de la gradiente descendente*.

Iniciamos con los cálculos del vector $\mathbf{a}_{j_1}$, la primer columna de la matriz $\hat{\mathbf{A}}$ que se desea estimar, para ello definimos la función a minimizar, la gradiente de la función con respecto a cada parámetro a estimar, que en este caso, para simplificar la notación en RStudio, establecemos que $a_{11} = a$, $a_{21} = b$, $a_{31} = c$, $a_{41} = d$ y $a_{51} = e$ (haremos una equivalencia semejante para las siguientes estimaciones), establecemos los valores iniciales de la iteración, establecemos el valor de la razón de aprendizaje para el método de minimización elegido, establecemos el número de iteraciones hasta obtener un valor convergente.

Los cálculos fueron realizados en RStudio, y los presentamos para facilitar la comprobación de los resultados obtenidos, así como comprobar la predicción afirmada por la teoría.

A continuación, se presentan en las figuras los códigos en RStudio de las simulaciones correspondientes a los 3 vectores linealmente independientes que la hipótesis considera.

Cálculos para $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$

```
Y11=44
Y12=63

# Define the function to minimize
f <- function(a, b, c, d, e) {return((Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e)^2 +
(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)^2 )}

# Gradient of the function with respect to each parameter
gradient <- function(a, b, c, d, e) {
  grad_a <- -6*(Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_b <- 2*(Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_c <- -8*(Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) + 6*(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_d <- -4*(Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_e <- -2*(Y11 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y12 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  return(c(grad_a, grad_b, grad_c, grad_d, grad_e))
}

# Initial parameter values

a <- -5
b <- 5
c <- -2
d <- 3
e <- 4

# Learning rate
alpha <- 0.01

# Number of iterations
iterations <- 100
```

Fig. 2. Cálculos para $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$.

Se realizaron iteraciones necesarias hasta alcanzar valores de convergencia, que se encuentran al final del código en color azul en la Figura 2.

```
# Perform gradient descent
for (i in 1:iterations) {
  # Compute gradient
  grad <- gradient(a, b, c, d, e)

  # Update parameters
  a <- a - alpha * grad[1]
  b <- b - alpha * grad[2]
  c <- c - alpha * grad[3]
  d <- d - alpha * grad[4]
  e <- e - alpha * grad[5]

  # Print current iteration and parameter values
  cat("Iteration:", i, "\n")
  cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")
}

# Print final result
cat("Final result:\n")
cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")

a: 7.977586 b: 5.751724 c: -1.960345 d: 10.63621 e: 12.38793
```

Fig. 3. Iteraciones para valores de convergencia.

Cálculos para $\alpha_{j_2}^{(0)}$

```
Y12=23
Y22=11

# Define the function to minimize
f <- function(a, b, c, d, e) {return((Y21 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e)^2 +
(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)^2 )}

# Gradient of the function with respect to each parameter
gradient <- function(a, b, c, d, e) {
  grad_a <- -6*(Y12 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_b <- 2*(Y12 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_c <- -8*(Y12 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) + 6*(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_d <- -4*(Y12 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_e <- -2*(Y12 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y22 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  return(c(grad_a, grad_b, grad_c, grad_d, grad_e))
}

# Initial parameter values

a <- -5
b <- 5
c <- -2
d <- 3
e <- 4

# Learning rate
alpha <- 0.01

# Number of iterations
iterations <- 100
```

Fig. 4. Cálculos para $\alpha_{j_2}^{(0)}$.

Se realizaron iteraciones necesarias hasta alcanzar valores de convergencia, que se encuentran al final del código en color azul en la Figura 4.

```
# Perform gradient descent
for (i in 1:iterations) {
  # Compute gradient
  grad <- gradient(a, b, c, d, e)
  # Update parameters
  a <- a - alpha * grad[1]
  b <- b - alpha * grad[2]
  c <- c - alpha * grad[3]
  d <- d - alpha * grad[4]
  e <- e - alpha * grad[5]

  # Print current iteration and parameter values
  cat("Iteration:", i, "\n")
  cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")
}

# Print final result
cat("Final result:\n")
cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")

a: -0.6689655 b: 3.82069 c: 2.875862 d: 5.834483 e: 5.655172
```

Fig. 5. Iteraciones para valores de convergencia.

Cálculos para $\alpha_{j_3}^{(0)}$

```
Y13=-26
Y23= 18

# Define the function to minimize
f <- function(a, b, c, d, e) {return((Y31 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e)^2 +
(Y32 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)^2 )}

# Gradient of the function with respect to each parameter
gradient <- function(a, b, c, d, e) {
  grad_a <- -6*(Y13 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y23 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_b <- 2*(Y13 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y23 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_c <- -8*(Y13 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) + 6*(Y23 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_d <- -4*(Y13 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -2*(Y23 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  grad_e <- -2*(Y13 - 3*a + b - 4*c - 2*d - e) -4*(Y23 - 2*a - b + 3*c - 1*d - 2*e)
  return(c(grad_a, grad_b, grad_c, grad_d, grad_e))
}

# Initial parameter values

a <- -5
b <- 5
c <- -2
d <- 3
e <- 4

# Learning rate
alpha <- 0.01

# Number of iterations
iterations <- 100
```

Fig. 6. Cálculos para $\alpha_{j_3}^{(0)}$.

Se realizaron iteraciones necesarias hasta alcanzar valores de convergencia, que se encuentran al final del código en color azul en la Figura 6.

```
# Perform gradient descent
for (i in 1:iterations) {
  # Compute gradient
  grad <- gradient(a, b, c, d, e)

  # Update parameters
  a <- a - alpha * grad[1]
  b <- b - alpha * grad[2]
  c <- c - alpha * grad[3]
  d <- d - alpha * grad[4]
  e <- e - alpha * grad[5]

  # Print current iteration and parameter values
  cat("Iteration:", i, "\n")
  cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")
}

# Print final result
cat("Final result:\n")
cat("a:", a, " b:", b, " c:", c, " d:", d, " e:", e, "\n")

a: -5.134483 b: 5.510345 c: -3.762069 d: 2.817241 e: 4.327586
```

Fig. 7. Iteraciones para valores de convergencia.

Obsérvese que en las tres iteraciones realizadas, han sido elegidos los mismos valores para los parámetros iniciales. La teoría afirma sobre la libertad de elegir cualesquiera parámetros iniciales, sin embargo, en esta investigación, para entender este método sugerido, nos dimos cuenta que hay parámetros iniciales que aproximan mejor que otros.

Enlistamos las tres columnas estimadas para $\hat{\mathbf{A}}$ correspondientes a la hipótesis inicial del problema analizado, que supone tener un rango igual a 3:

$$\mathbf{a}_{j_1}^{(0)} = \begin{pmatrix} 7.977586 \\ 5.751724 \\ -1.960345 \\ 10.63621 \\ 12.38793 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_{j_2}^{(0)} = \begin{pmatrix} -0.6689655 \\ 3.82069 \\ 2.875862 \\ 5.834483 \\ 5.655172 \end{pmatrix}, \mathbf{a}_{j_3}^{(0)} = \begin{pmatrix} -5.134483 \\ 5.510345 \\ -3.762069 \\ 2.817241 \\ 4.327586 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Una vez determinados los vectores linealmente independientes de $\hat{\mathbf{A}}$, nos referimos a los vectores $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$, $\mathbf{a}_{j_2}^{(0)}$ y $\mathbf{a}_{j_3}^{(0)}$, podemos pasar a la siguiente etapa para poder minimizar la expresión (11.7).

Etapa 3

Sustituimos los vectores $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$, $\mathbf{a}_{j_2}^{(0)}$ y $\mathbf{a}_{j_3}^{(0)}$ en la expresión (11.7) y minimizamos la expresión resultante, a través del hecho de que la función resultante es convexa y así, cualquier punto crítico de la función, resulta ser mínimo local. Una vez encontrados los valores de b_{41} , b_{42} y b_{43} , estamos en condiciones de construir a $\mathbf{a}_{j_4}^{(0)}$, como una combinación lineal de $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$, $\mathbf{a}_{j_2}^{(0)}$ y $\mathbf{a}_{j_3}^{(0)}$. A continuación, presentamos la función que modela la parte de la muestra relacionada con la expresión (11.7), cuyos parámetros

desconocidos deseamos estimar, se refiere a la que nos permite la estimación de los coeficientes b_{41} , b_{42} y b_{43} , de la combinación lineal afirmada por la hipótesis, es decir

$$\mathbf{a}_{j_4}^{(0)} = b_{41}\mathbf{a}_{j_1}^{(0)} + b_{42}\mathbf{a}_{j_2}^{(0)} + b_{43}\mathbf{a}_{j_3}^{(0)} \quad (13)$$

La función que nos permite estimar b_{41} , b_{42} y b_{43} , a partir de conocer a las cuartas entradas de la muestra, y_{14} , y_{24} , y de los vectores estimados $\mathbf{a}_{j_1}^{(0)}$, $\mathbf{a}_{j_2}^{(0)}$ y $\mathbf{a}_{j_3}^{(0)}$, es

$$f(a, b, c) = (15 - b_{41}(43.999) - b_{42}(22.999) + b_{43}(25.999))^2 + (110 - b_{41}(62.995) - b_{42}(11.003) - b_{43}(17.999))^2 \quad (14)$$

Veamos cómo fue obtenida la mencionada función. Para ello, tal como lo recomiendan los autores del manuscrito [1], estaremos a $\mathbf{a}_{j_4}^{(0)}$ (la cuarta columna de la matriz $\hat{\mathbf{A}}$ que deseamos estimar) a partir de la expresión en (11.7), junto con los valores de los parámetros que contiene la muestra dada, $n = 2$, el tamaño de la muestra, $k = 4$, la cuarta coordenada de las variables resultantes $\mathbf{Y}_1$ y $\mathbf{Y}_2$, y $r = 3$, el tamaño del rango de la matriz a estimar $\hat{\mathbf{A}}$.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^2 \sum_{k=4 \notin \{j_1=1, j_2=2, j_3=3\}} (y_{ik} - \mathbf{X}_i^T \sum_{l=1}^r b_{kl})^2 \\ &= \sum_{i=1}^2 \left(y_{i4} - \left(\sum_{l=1}^3 b_{4l} \mathbf{X}_i^T \mathbf{a}_{j_l}^{(0)} \right) \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^2 \left(y_{i4} - b_{41}(\mathbf{X}_i^T \mathbf{a}_{j_1}^{(0)}) - b_{42}(\mathbf{X}_i^T \mathbf{a}_{j_2}^{(0)}) - b_{43}(\mathbf{X}_i^T \mathbf{a}_{j_3}^{(0)}) \right)^2 \\ &= (y_{14} - b_{41}(\mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_{j_1}^{(0)}) - b_{42}(\mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_{j_2}^{(0)}) - b_{43}(\mathbf{X}_1^T \mathbf{a}_{j_3}^{(0)}))^2 \\ &+ (y_{24} - b_{41}(\mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_{j_1}^{(0)}) - b_{42}(\mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_{j_2}^{(0)}) - b_{43}(\mathbf{X}_2^T \mathbf{a}_{j_3}^{(0)}))^2 \\ &= (15 - b_{41}(43.999) - b_{42}(22.999) + b_{43}(25.999))^2 \\ &+ (110 - b_{41}(62.995) - b_{42}(11.003) - b_{43}(17.999))^2 \end{aligned}$$

En la investigación realizada para intentar minimizar los términos en la expresión (11.7), ha resultado ser poco efectivo el *método de la gradiente descendente*, ya que los valores a los que convergen, en el método son valores extremadamente grandes, a saber, $b_{41} = -1.5319 \times 10^{211}$, $b_{42} = -4.6550 \times 10^{210}$ y $b_{43} = 1.9027 \times 10^{210}$, cantidades que resultan ser poco prácticas para nuestros fines, además de estar truncadas. Así que para minimizar los términos en la ecuación (14), utilizaremos el hecho que la misma es una función convexa, así que, si un punto crítico al ser evaluado en la función me da 0 (o virtualmente 0, debido a manejo de valores truncados), nos aseguramos de encontrar un mínimo local.

A continuación, los cálculos necesarios para minimizar los términos en la ecuación (14) (véase Fig. 8).

```
# Define the function to minimize
f(a, b, c) = (15 - 43.999*a - 22.999*b + 25.999*c)^2 + (110 - 62.995*a - 11.003*b - 17.999*c)^2

# To find a critical point
grad_a <- -87.998*(15 - 43.999*a - 22.999*b + 25.999*c) - 125.99*(110 - 62.995*a - 11.003*b - 17.999*c) = 0
grad_b <- -45.998*(15 - 43.999*a - 22.999*b + 25.999*c) - 22.006*(110 - 62.995*a - 11.003*b - 17.999*c) = 0
grad_c <- 51.998*(15 - 43.999*a - 22.999*b + 25.999*c) - 35.998*(110 - 62.995*a - 11.003*b - 17.999*c) = 0

# An equivalent system
11808.56*a + 3410.134*b - 20.16599*c = 15178.87
3410.134*a + 1300.04*b - 799.816*c = 3110.63
-20.16599*a - 799.816*b + 1999.824*c = 3179.81

# Solution parameter values
a= 0.071848
b= 4.2217
c=3.27921

# A value almost 0
(15 - 43.999*a - 22.999*b + 25.999*c)^2 + (110 - 62.995*a - 11.003*b - 17.999*c)^2 = 8.695449e-09
=0.0000008695449
```

Fig. 8. Cálculos para minimizar los términos de la ecuación (14).

De acuerdo con los cálculos, los valores de los coeficientes que satisfacen la ecuación (14) son

$$a = b_{41}^{(0)} = 0.071848, \quad b = b_{42}^{(0)} = 4.2217 \quad y \quad c = b_{43}^{(0)} = 3.27921$$

y con estos valores estimados, podemos calcular la cuarta columna de la matriz $\hat{\mathbf{A}}$, nos referiremos al vector $\mathbf{a}_{j_4}^{(0)}$,

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{j_4}^{(0)} &= b_{41}^{(0)} \mathbf{a}_{j_1}^{(0)} + b_{42}^{(0)} \mathbf{a}_{j_2}^{(0)} + b_{43}^{(0)} \mathbf{a}_{j_3}^{(0)} \\ &= (0.071848) \begin{pmatrix} 7.977 \\ 5.751 \\ -1.960 \\ 10.636 \\ 12.387 \end{pmatrix} + (4.2217) \begin{pmatrix} -0.668 \\ 3.820 \\ 2.875 \\ 5.834 \\ 5.655 \end{pmatrix} + (3.27921) \begin{pmatrix} -5.134 \\ 5.510 \\ -3.762 \\ 2.817 \\ 4.327 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

que al simplificar obtenemos

$$\mathbf{a}_{j_4}^{(0)} = \begin{pmatrix} -19.082 \\ 34.608 \\ -0.339 \\ 34.631 \\ 38.952 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Finalmente, con los vectores estimados en la ecuaciones (12) y (15), hemos completado la búsqueda de las 20 incógnitas que conforman la estimación de la matriz $\hat{\mathbf{A}}$ que se aproxima al modelo lineal multivariado en (1), cuya transpuesta ya habíamos presentado en (3).

IV. CONCLUSIONES

Este artículo introduce parcialmente a un algoritmo en computación cuántica no oracular NQS aplicado a un modelo lineal multi-respuesta (el único conocido hasta ahora, de acuerdo a sus autores), aunque no es una innovación la construcción de una matriz de coeficientes en un modelo lineal multivariado a través de obtener las columnas linealmente independientes de la misma, y el resto de columnas construirlas como una combinación lineal de las mencionadas, sí lo es el concepto de *no oracular* dentro de un algoritmo cuántico (por ejemplo el algoritmo de Grover, que tiene la desventaja notable de inicialmente conocer, o bien, suponer conocido el estado solución, dentro de un conjunto de estados cuánticos o bien vectores, situación que les pasa a los algoritmos cuánticos oraculares conocidos, en la vida real usualmente no se dispone de tal información). La implementación completa del algoritmo cuántico NQS resuelve un problema NP-hard.

Nuestra contribución ofrece una alternativa en el tratado de modelos lineales multi-respuesta respecto del tradicional método de descomposición en valores singulares o del método mínimo cuadrados penalizados, nos referimos a la optimización de la función de pérdida L_n . A diferencia de muchos trabajos teóricos, el nuestro implementa detalladamente el proceso de optimización de un modelo complejo utilizando datos realistas calculando de manera explícita a cada uno de sus estimadores, incluyendo un ejemplo de los códigos utilizados para obtenerlos, para impulsar la reproducibilidad y aplicabilidad del método, para científicos o para quienes quisiesen explorar el mismo sin que sea la falta de la comprensión teórica o técnica computacional un factor para su estudio o aplicación. Nuestro trabajo vive en la intersección de disciplinas tales como computación cuántica, optimización computacional, física aplicada, matemáticas aplicadas, ingeniería y estadística; así que la presente investigación puede impactar en una amplia comunidad. Prepara un marco de trabajo para la optimización de un problema NP-hard (cuando el rango de la matriz de coeficientes no es conocido), punto de inicio para futuras exploraciones en el tema. Nuestro documento tiene la didáctica suficiente para guiar al lector desde los supuestos teóricos hasta el uso de práctico de codificación computacional, lo que lo convierte en una herramienta para los investigadores al abordar o comprender modelos similares y para los docentes una herramienta excelente.

Otra aplicación de gran importancia radica en la predicción de valores de una muestra no conocida, a partir de valores de una muestra conocida. Esta aplicación podría ser de gran interés para áreas de estudio poco involucradas con las matemáticas avanzadas, tales como la medicina, psicología, demografía, etc.

Este modelo nos permite manejar variables de manera simultánea, así el análisis para obtener la solución es versátil. Por supuesto que resolver el modelo nos permite predecir las respuestas para muestras de nuestro interés. Las hipótesis que requiere el método propuesto en [1] son muy claras, tales como la independencia lineal de las columnas, el rango y el tamaño de la matriz, etcétera.

En términos generales, el modelo lineal multivariado ofrece muchas ventajas, sin embargo, se debe tener cuidado en su uso, teniendo en cuenta sus alcances, supuestos y limitaciones, para poder aplicarlos adecuadamente.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Contribuciones de los autores: Conceptualización / Metodología / Software / Investigación / Redacción y preparación del borrador original / Redacción, revisión y edición / Supervisión / Análisis formal / Administración del proyecto / Adquisición de fondos: **VHHC**.

Financiamiento: El autor declara que este trabajo se realizó con recursos propios.

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos se encuentran en el artículo.

Agradecimientos: I would like to express my sincere gratitude to Dr. Jinyang Chen from The University of Georgia Athens and Dr. Yuan Ke from The University of Georgia Athens, for kindly taking the time to answer my query regarding a function presented in their article. Their clarification was essential to ensuring the accuracy and clarity of the dissemination work I developed based on their research.

Conflicto de interés: El autor declara que no existe conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] J. Chen, C. Park, Y. Ke, “Learning High Dimensional Multi-response Linear Models with Non-oracular Quantum Search,” IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), 18-23 September 2022, Broomfield, CO, USA. <https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00018>
- [2] C. Zou, Y. Ke, W. Zhang, “Estimation of Low Rank High-Dimensional Multivariate Linear Models for Multi-Response Data.” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 117, no. 538, pp. 693–703. <https://doi.org/10.1080/01621459.2020.1799813>
- [3] D. McMahon, *Quantum computing explained*, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [4] A. Lopatnikova, T. Minh-Ngoc, S. Sisson, “An introduction to quantum computing for statisticians and data scientists”, 2021, arXiv preprint: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021arXiv211206587L/doi:10.48550/arXiv.2112.06587
- [5] A. Lounsbury Andrew, *Singular Value Decomposition*, technical report, Tennessee Technological University, 2018. <https://www.tntech.edu/cas/pdf/math/techreports/TR-2018-2.pdf>
- [6] D. K. Ferry, “Quantum computing and probability,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 21, no. 47, 2009, <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/47/474201>
- [7] X. Bing, M. Wegkamp, “Adaptive estimation of the rank of the coefficient matrix in high-dimensional multivariate response regression models,” *The Annals of Statistics*, JSTOR, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.02381>
- [8] W. J. Welch, “Algorithmic complexity: three NP-hard problems in computational statistics,” *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 15, no. 1, 1980. <https://doi.org/10.1080/00949658208810560>
- [9] T. W. Anderson, *An introduction to multivariate statistical analysis*, USA: Wiley New York, 1958.
- [10] A. Prakash, *Quantum algorithms for linear algebra and machine learning*, University of California, Berkeley, 2014. <https://escholarship.org/uc/item/5v9535q4>
- [11] T. W. Anderson, “Estimating linear restrictions on regression coefficients for multivariate normal distributions,” *The Annals of Mathematical Statistics*, JSTOR, vol. 22, no. 3, pp. 327-351, 1951. <https://www.jstor.org/stable/2236620>

WebVR Platform for Simulation and Control of Electromechanical Systems in a Virtual Environment

Plataforma WebVR para la simulación y el control de sistemas electromecánicos en un entorno virtual

Michel Alejandro **Cruz Martínez**¹, Alejandro **Rodríguez Molina**², Gerardo **Hernández Hernández**³,
Mario **Aldape Pérez**⁴, Miguel Gabriel **Villarreal Cervantes**⁵, Allan Balam **Rueda Gutiérrez**⁶

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, MÉXICO

¹ORCID: 0009-0007-4924-2261 | M15250271@tlalnepantla.tecnm.mx

Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Colegio de Ciencia y Tecnología, Ciudad de México, MÉXICO

²ORCID: 0000-0002-6901-3833 | alejandro.rodriguez.molina@uacm.edu.mx

³ORCID: 0009-0001-2268-1930 | gerardo.hernandez.hernandez@uacm.edu.mx

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, Ciudad de México, MÉXICO

⁴ORCID: 0000-0002-1504-4714 | maldape@ipn.mx

⁵ORCID: 0000-0002-7565-8128 | mvillarrealc@ipn.mx

⁶ORCID: 0009-0002-1887-8148 | allan.rg@tlalnepantla.tecnm.mx

Recibido 16/04/2025, aceptado 25/06/2025.

Abstract

Electromechanical systems play a crucial role in many modern applications. To exploit them effectively, it is essential to tune their controllers appropriately. This tuning usually involves an iterative process of experimenting with the real system on a physical platform. However, to minimize risks and reduce costs, it is more convenient to use simulations of both the systems and their controllers on virtual platforms. Current virtual platforms allow simulations of varying complexity to be carried out using different technologies. Despite this, they have important limitations such as low accessibility, lack of interactive visualization, scarcity of platforms offering accurate simulations of electromechanical systems with kinematic and dynamic models, and dependence on proprietary software and expensive hardware. In addition, emerging technologies such as WebVR, which could increase accessibility and improve immersion at a reasonable cost, are not taken advantage of. To overcome these barriers, this paper proposes a methodology for the development of virtual platforms of electromechanical systems using WebVR. This methodology allows realistic and real-time simulations, with 3D visualizations, interactivity and parameter configuration. The methodology has been successfully applied in the development of a virtual platform for three fully-actuated electromechanical systems: the simple pendulum, the linear inverted pendulum, and the double pendulum.

Index words: virtual platform, WebVR, electromechanical systems, simulation, control.

Resumen

Los sistemas electromecánicos desempeñan un papel crucial en muchas aplicaciones modernas. Para utilizarlos de manera efectiva, es esencial ajustar correctamente sus controladores. Este ajuste generalmente implica un proceso iterativo de experimentación con el sistema real en una plataforma física. Sin embargo, para minimizar riesgos y reducir costos, es más conveniente utilizar simulaciones tanto de los sistemas como de sus controladores en plataformas virtuales. Las plataformas virtuales actuales permiten realizar simulaciones de diversa complejidad mediante diferentes tecnologías. A pesar de esto, presentan limitaciones significativas, como baja accesibilidad, falta de visualización interactiva, escasez de plataformas que ofrezcan simulaciones precisas de sistemas electromecánicos con modelos cinemáticos y dinámicos, y dependencia de software propietario y hardware costoso. Además, tecnologías emergentes como WebVR, que podrían mejorar la accesibilidad y la inmersión a un costo razonable, no están siendo aprovechadas. Para superar estas barreras, este trabajo propone una metodología para el desarrollo de plataformas virtuales para sistemas electromecánicos utilizando WebVR. Esta metodología permite realizar simulaciones realistas en tiempo real con visualización 3D, interactividad y configuración de parámetros. La metodología se ha aplicado con éxito en el desarrollo de una plataforma virtual para tres sistemas electromecánicos completamente actuados: el péndulo simple, el péndulo lineal invertido y el péndulo doble.

Palabras clave: plataforma virtual, WebVR, sistemas electromecánicos, simulación, control.

I. INTRODUCTION

Electromechanical systems consist of mechanical and electrical components that work together to perform specific tasks. These systems are widely used in various areas, such as medicine (in medical instruments or diagnostic equipment) [1], engineering (in specialized machines, actuators and controllers for industry) [2] and in various devices for everyday use, such as means of transportation [3] and household appliances [4]. As a particular type of dynamic systems, electromechanical systems have a number of minimal states or variables that allow describing their behavior at any time [5].

For an electromechanical system to function correctly and effectively fulfill the task for which it was designed, it is necessary for its states to be managed by a control system or controller [6]. Control engineering is responsible for the design, adjustment and optimization of these controllers, ensuring that the system as a whole operates efficiently and accurately. This discipline is essential to ensure stability, dynamic response and performance in a wide range of industrial and technological applications.

Controller tuning involves tuning the parameters or gains of a controller using a model that roughly represents the dynamics of the plant, i.e., the system to be controlled, over time [7]. This tuning can be done empirically, based on direct experience and observation, or automatically, using computational technology to optimize the parameters more accurately and efficiently [8].

Regardless of the approach used to tune the controller of an electromechanical system, this process usually requires multiple experimental iterations on physical platforms. That is, several tests are performed where the performance of the controlled system is evaluated under different configurations of the controller parameters until the specific requirements of the application are met. If these iterations are carried out using the real system, costs (such as operational and maintenance costs) and risks (such as those associated with unexpected or undesired system behavior under certain controller configurations) tend to increase considerably.

For this reason, in most cases, it is preferable to use a simulation of the controlled system in a simulated environment or virtual platform during the iterative process of controller tuning [9]. Simulating the system in a virtual platform involves using models that accurately replicate the operation of real systems, which allows testing and experimentation to understand and analyze the behavior of systems under different environmental and operating conditions, without incurring the costs and risks associated with direct experimentation on real systems. Once the process is completed, the fine-tuned controllers can be implemented in real systems.

Simulations performed on virtual platforms can vary in their level of complexity, ranging from simple graphical representations or basic numerical results to advanced options that employ interactive 3D graphics. When these more advanced simulations include computer-generated 3D graphics, they are known as virtual reality simulations [10]. Virtual reality is a rapidly growing field within engineering, with applications in research and in the development of new technologies [11]. This type of simulations offers a more immersive and detailed interaction with the simulated models, which facilitates the understanding, use and optimization of the systems, allowing to extrapolate their behavior to the real world.

Nowadays, there are several virtual platforms designed to develop simulations of dynamic systems for different purposes. Below are some examples of these platforms, many of them focused on electromechanical systems.

In response to the COVID-19 pandemic, several virtual platforms have been developed for the educational sector as alternatives to experimentation in physical facilities, offering students the possibility to continue their training in simulated environments. A notable example is the work presented in [12], which describes a virtual fluid mechanics platform designed for student instruction. This platform uses the VLAB simulator to generate 2D simulations, employing mathematical models of fluid mechanics controlled by valves and other mechanical components. Another approach in virtual education is found in [13], where a virtual platform for teaching Fourier series in mathematics is presented. This platform allows manipulating electrical and physical signals using Java-based interactive free software. The simulations employ mathematical models to adjust the amplitude and frequency of these signals. In the field of optics and photonics, [14] introduces a virtual platform aimed at teaching these subjects to engineering students, where learning is evaluated by means of 2D optical diffraction and photonic simulations using VLAB.

On the other hand, [15] describes a virtual platform designed for engineering students that allows the implementation of virtual industrial control and automation plants. This platform incorporates electromechanical systems such as pistons and sensors, and uses Autodesk Inventor to develop the 3D environment of the plant, together with MATLAB's Simulink to control the 2D and 3D motions. The control system is implemented using a Programmable Logic Controller (PLC). Similarly, [16] presents a virtual platform to simulate a smart house, integrating mechanical, electronic and electrical systems. The simulation is performed using LabView and a house simulator called HOME I/O, which allows mathematically modeling the house systems, including motion sensors and actuators. A comparable approach is found in [17], where a virtual platform for teaching electrical machines is introduced. This platform allows students to perform practices of different difficulty levels according to their skills, using Web programming for implementation. Although algorithms and flowcharts are handled, electrical models and control elements are not detailed. Finally, the work in [18] explores a virtual platform for teaching chemical reactions, using software such as kineticsTM and MoDSTM to simulate 2D experiments.

The research in [19] presents a non-immersive virtual platform to simulate the behavior of a Mitsubishi Melfa RV 2SDB robotic arm. This simulation, implemented with Unity 3D, integrates mathematical models that allow replicating the control, mechanical and electronic components of the robotic arm. In a different context, [20] develops a remotely controlled power electronics experiment through a virtual platform. This platform includes oscilloscopes and adjustable power electronic circuits, which are operated remotely via Web programming. Although physical devices are used, no electronic models or equations are simulated, and the platform is limited to the operation of the measurement devices. In addition, [21] introduces a virtual platform that simulates the operation of various electrical machines using technologies such as Oculus Rift, Unity3D, and Leap Motion. This platform combines electrical models with control systems to simulate different electromechanical systems. In the field of motion platform simulation, [22] develops a visual compensation scheme for the Stewart 6DOF platform, used in flight simulators. The simulation is carried out with Simulink, while a C++ program is used to adjust the virtual information and apply compensation algorithms. The work of [23] focuses on virtual training with augmented reality to improve motor skills in medical rehabilitation, using virtual reality systems such as HTC VIVE and Oculus Rift. Finally, in [24], a virtual platform is described that simulates the interaction of a patient with a respiratory ventilator, using an electromechanical lung simulator. This simulator incorporates motors, controllers and sensors, in addition to virtualization technology to emulate the normal respiratory functions of a patient.

A different approach is presented in [25], where a 3D virtual simulator for hysteroscopy is evaluated using Leap Motion and Unity 3D. This simulator combines virtual reality with a 3D printed hysteroscope. In the field of industrial simulation, [26] introduces a virtual forklift simulator, developed with Unreal Engine. This simulator includes 3D models manipulated using a Logitech steering wheel and joystick. The paper in [27] describes a 3D simulator to analyze the behavior of aerial manipulator robots in control tasks, using Unity 3D and MATLAB. The simulations are based on kinematic equations and a control law, and integrate a haptic device to operate the robot. On the other hand, [28] presents an interface between a Siemens PLC simulator and a program in Visual Studio, which connects the simulation of an electromechanical plant. This simulation includes interactive elements and 2D models of the plant. In [29], a virtual platform for engineering education using industrial robots and automation systems is developed. The simulation is implemented with MATLAB and Unity3D, employing kinematic and dynamic models for industrial robots, with control elements visualized in 3D. The work in [30] introduces a virtual platform for engineering electrical materials, complemented with an electronic textbook and databases of virtual experiments, implemented with JSON-based Web technology, ASP.Net and Adobe Flash. Finally, [31] describes a virtual platform for testing electrical induction machines, using circuit models and electrical equations. The control is performed by PLC, and the simulation is carried out in a 3D virtual environment.

Based on the previous review, many of the simulations in current virtual platforms present significant limitations that affect both their effectiveness and accessibility. On the one hand, there are simulations that lack a visual interface, showing only numerical results, which can make it difficult to understand the concepts and limit interaction with users. In addition, there is a notable shortage of platforms dedicated to electromechanical

systems, and those that do include them often do not use kinematic or dynamic models, which decreases the fidelity of the simulations compared to reality. This lack of accuracy is compounded by the absence of control elements, which restricts the development of advanced tasks such as controller tuning.

Another important limitation is that most simulators require the installation of specialized software, which is often proprietary, which restricts their accessibility and may involve additional costs. In addition, the need to acquire expensive hardware for their operation can be a considerable obstacle, especially in contexts where resources are limited. Finally, it has been observed that current virtual platforms have not taken advantage of emerging technologies such as Web Virtual Reality (WebVR), which could offer more accessible, immersive and flexible solutions for the development and exploitation of simulations of these systems and their environments.

Aiming to overcome these limitations, this work proposes a methodology to develop virtual platforms for electromechanical systems, taking advantage of the benefits of WebVR technology, such as its low cost and high accessibility. It is intended that the platforms developed under this methodology simulate kinematic, dynamic and control aspects of electromechanical systems, providing realistic 3D visualizations of their behavior in real time. In addition, we seek to integrate interactive mechanisms that facilitate the manipulation of the visualizations and the configuration of various parameters of the simulation.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 briefly describes the stages of the proposed methodology. In Section 3, the methodology is applied in the development of a virtual platform for three fully-actuated electromechanical systems: the simple pendulum, the linear inverted pendulum, and the double pendulum. Finally, Section 4 presents conclusions and offers future perspectives on this work.

II. DEVELOPMENT METHODOLOGY

The stages that make up the methodology for the development of virtual platforms in WebVR, intended for the simulation and control of electromechanical systems, are illustrated in Fig. 1.

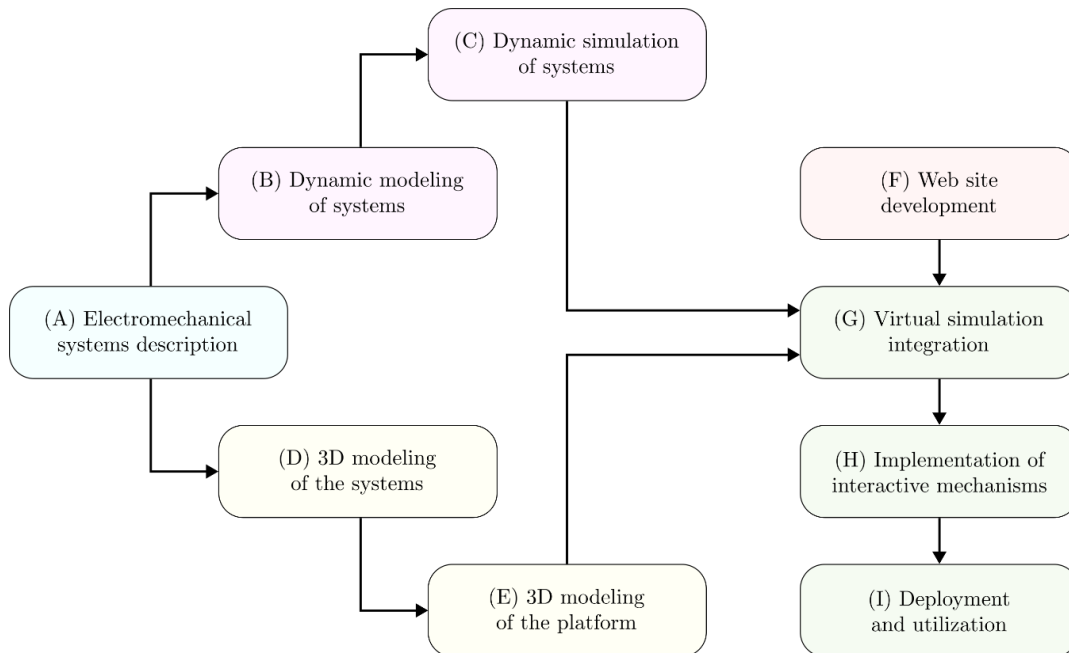


Fig. 1. Methodology for the development of virtual platforms in WebVR for the simulation and control of electromechanical systems.

A. Electromechanical systems description

The first stage focuses on the analysis of the electromechanical systems that will integrate the virtual platform. This analysis allows identifying and describing the most relevant aspects of each system and its operation, which is essential for its subsequent modeling or abstraction in the different stages of the methodology. Key information to be analyzed for any electromechanical system includes its dimensions in a standard measurement system, the movements that its mechanical parts can perform (both independently and together), the electrical inputs that generate those movements and their limitations, the states that describe its behavior at any time, the parameters (internal or from the operating environment) involved in its operation, the initial configuration in terms of states, the controllers, and the operational constraints. In addition, it is crucial to collect information about the physical appearance of the systems and their environment (i.e., the platform and other objects that might be present), in order to create models or visual representations that are familiar to users.

B. Dynamic modeling of systems

Due to the very nature of electromechanical systems, there are well-defined electrical and mechanical rules that allow us to derive accurate models of their behavior at different levels of detail. At this stage, these rules are used to obtain dynamic models of the systems that make up the platform. A dynamic model is a mathematical representation that describes how the relationships between the inputs and outputs of a dynamic system vary over time. Like any model, the accuracy with which the dynamic model reflects the real system depends on the values of its parameters. Some of these values can be derived from the system description performed in step (A), while others require estimation through a system identification process based on data or measurements of the real system [32].

C. Dynamic simulation of systems

Dynamic simulation consists of using the dynamic models obtained in step (B) to predict, by means of a computer, the time evolution of the states of the electromechanical systems from their initial configurations, taking into account the operational constraints, both defined in step (A). Depending on the characteristics of the model, its use can be direct or indirect. In the indirect case, in addition to the model, some numerical or computational method is required to make the predictions. It is advisable to encapsulate the functionalities of the dynamic simulation in a computer program built with Web technology, particularly with JavaScript (JS), to facilitate its use in other stages.

As a result of the dynamic simulation, values of the states of the systems are obtained in discrete sampling intervals with a reasonably small size. These values will be used in later stages to manipulate visual representations of the systems in real time, creating a realistic perception of their motion. Therefore, it is crucial to consider that if the sampling intervals are too large, the visualization of the systems will not be smooth. On the other hand, if the intervals are too small, the computational load will increase proportionally, which could affect the smoothness of the visualization.

D. 3D modeling of the systems

This type of modeling refers to the creation of visual representations of dynamic systems and other objects present on the platform, using 3D geometries that can be visualized on a computer. This task requires specialized software that allows generating and manipulating 3D geometries through operations such as translation, rotation, scaling and extrusion. In addition, these tools allow the assignment of materials, i.e., properties of the surfaces of 3D objects that determine their appearance, such as color or texture. Although there are many 3D modeling software options on the market, free software alternatives such as Blender [33] are highly recommended to overcome the cost limitations observed in other virtual platforms.

Since the methodology contemplates the deployment of the virtual platform on the Web, it is important to consider certain aspects during modeling to optimize the visualization of the 3D elements. In this regard, care must be taken to ensure that the polygons that define the surfaces of the 3D objects are well distributed and that there is no interference between the independent geometries that make up the objects. The dimensions and appearance of the 3D objects should be congruent with those of the real objects, as defined in step (A). Fine details in the models should be moderated to avoid excessive computational cost when displaying them, and it is recommended that the moving parts of the virtual electromechanical systems be identified with representative names to facilitate their manipulation in later stages.

6

E. 3D modeling of the platform

In this stage, the 3D models of the electromechanical systems and other objects present on the platform, obtained in stage (D), are arranged within the same virtual space. This arrangement of the models should be similar to that of the real platform, so that it is familiar to the end users. The same 3D modeling software used in stage (D) can be used for this purpose.

Once the 3D elements are organized in the same environment, the platform can be exported to a format that facilitates manipulation on the Web. In particular, this methodology proposes the use of the glTF format (GL Transmission Format), as it allows an optimized transmission and loading of the 3D environments, and facilitates the manipulation of its elements using Web technologies such as JS).

F. Web site development

This refers to the use of Web technology to create a customized Web site or page that will host the virtual platform and allow interaction with it [34]. In this process, the interactive, navigation and content elements in the site's user interface, as well as their structure and layout, are implemented using HTML (HyperText Markup Language). The visual appearance of these elements is defined using CSS (Cascading Style Sheets). The real-time manipulation or update of these elements and the handling of the interactivity related to the triggered events is achieved through JS.

G. Virtual simulation integration

In this stage, the dynamic simulation of the electromechanical systems, described in stage (C), is performed in real time, i.e., aligning the selected sampling interval with the time elapsed in reality. The data obtained are used to manipulate the 3D objects representing these systems within the virtual platform, developed in step (E).

First, the 3D model of the virtual platform in glTF format, obtained in step (E), is loaded into the Web site created in step (F). Then, the virtual environment is configured using JS to obtain a proper visualization of the platform. This configuration includes the adjustment of the elements that simulate the lighting and the camera, i.e., the point of view of the virtual space. This viewpoint is rendered as a visible image within the site and is periodically updated to visually reflect changes in the platform, providing a sense of dynamism to the user. In addition, references are created to the moving elements of the 3D objects on the platform, previously identified with representative names, to facilitate their manipulation.

Secondly, the functionality related to the dynamic simulation of the electromechanical systems, obtained in stage (C), is also loaded into the website in stage (F). Next, variables are created in JS to store the current states of the simulation.

Finally, the integration of the results of stages (C) and (E) is achieved by implementing a scheduled task in JS, which is executed each time a real-time sampling interval elapses. This task is in charge of calculating a step forward in the dynamic simulation of the systems, i.e., obtaining the states of the systems in a future sampling interval. Once this calculation has been performed, the state information is immediately used to manipulate the position and orientation of the moving elements in the 3D virtual models of the electromechanical systems.

H. Implementation of interactive mechanisms

This stage is responsible for receiving and processing all actions or inputs generated by the user on the Web site created in stage (F) to trigger changes in the integrated virtual simulation of stage (G). In this way, functionalities can be added with JS that allow the user to navigate the virtual platform using their computer input devices, enhancing their level of immersion in the environment. In addition, the user can be allowed to configure different aspects of the simulation, such as the tasks to be performed by the electromechanical systems, their initial conditions and other control elements, by processing the input fields in the user interface with JS. Through other interactive elements in the interface, such as buttons, the user can make decisions, such as when to start or stop the simulation, using functions implemented in JS.

I. Deployment and utilization

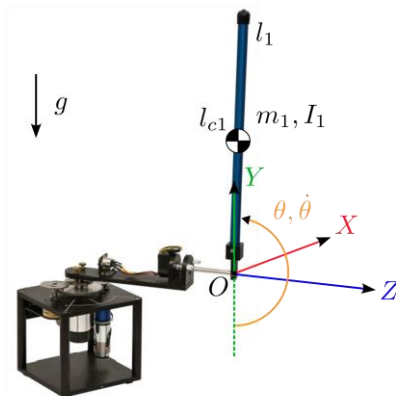
The deployment of the interactive Web site obtained at the end of step (H) for the simulation and control of electromechanical systems on a virtual platform consists of making it accessible to end users by hosting it on a Web server. Since a WebVR application does not require specialized hardware or software infrastructure, nor large amounts of server-side processing, the virtual platform can be effectively deployed on an inexpensive or even free hosting service. Once deployed, end users can access the platform from anywhere, anytime, using only an up-to-date Web browser on any type of computing device, from a low- to mid-range mobile device to a high-capacity workstation. This helps overcome many of the limitations present in today's virtual platforms.

III. DEVELOPMENT OF A VIRTUAL PLATFORM FOR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

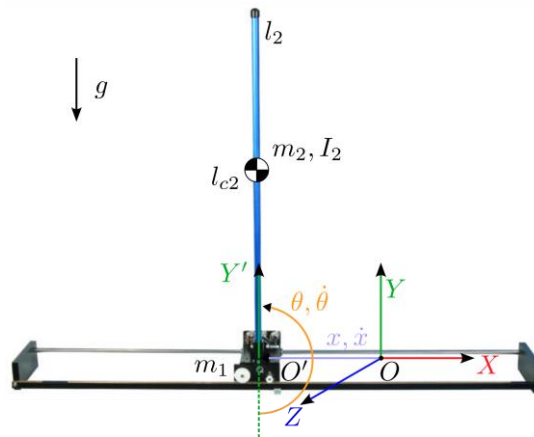
This section analyzes the results obtained during the development of a virtual platform in WebVR for the simulation and control of electromechanical systems, based on the methodology presented in this work. It is assumed that the real platform incorporates two electromechanical systems: a simple pendulum and a linear inverted pendulum, both fully actuated.

A. Electromechanical systems description

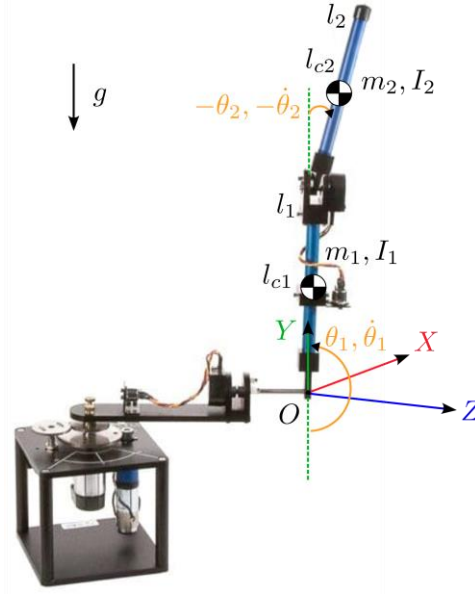
For the purposes of this work, systems visually similar to those shown in Fig. 2 are considered. In addition, it is assumed that other objects and office furniture are also found within the virtual platform. All measurements taken during the description stage are in the International System of Units.



(a) Simple pendulum



(b) Inverted pendulum



(c) Double pendulum

Fig. 2. Electromechanical systems included in the platform.

The simple fully-actuated pendulum (ASP) depicted in Fig. 2(a) consists of a pendulum of length l_1 , whose end is fixed coupled with a base at the origin O , and which can rotate freely around the Z -axis thanks to the torque τ generated by an electric motor. The state describing its behavior at any instant of time t is given by $z = [\theta, \dot{\theta}]^T$, where θ and $\dot{\theta}$ are the angular position and velocity of the pendulum measured with respect to the $-Y$ -axis. This system is considered to be influenced by Earth gravity and nonconservative frictional forces, and is initially found to be in stable equilibrium, i.e., $z = [0, 0]^T$. In addition, a position regulation task is set for the system with the desired state $z_d = [\theta_d, 0]^T$, where θ_d is the desired angular position for the pendulum. The controller used to perform this task is a Proportional Integral Derivative (PID), as shown in Eq.1 [35], where $u = \tau$ is the control signal calculated from the error $e = \theta_d - \theta$ at any time, using the proportional k_p , integral k_i and derivative k_d gains.

$$u = k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e} \quad (1)$$

On the other hand, the fully-actuated inverted pendulum (AIP) shown in Fig. 2(b) has a moving base that is linearly displaced by the force f . This force is generated by a moving belt driven by an electric motor. The linear motion of the base occurs within the limits defined by $[x_{min}, x_{max}]$ along the X -axis, which belongs to a fixed coordinate system with origin O at the center of the rigid frame of the system. At the origin O' , which coincides with the position of the moving base, is located the end of a pendulum of length l_2 , which can rotate freely around Z' thanks to the torque τ generated by another electric motor. The state of this system at any instant of time t is defined as $z = [x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}]^T$, where $x, \dot{x}$ represent the linear position and velocity of the moving base with respect to O , and $\theta, \dot{\theta}$ are the angular position and velocity of the pendulum measured from $-Y'$. This system is affected by Earth gravity and frictional forces. Initially, the moving base of the AIP is at the center of the rigid frame of the system and the pendulum is in stable equilibrium, i.e., $z = [0, 0, 0, 0]^T$. As with the ASP, the AIP is sought to perform a position regulation task, with a desired state of $z_d = [x_d, \theta_d, 0, 0]^T$, where x_d and θ_d are the desired positions of the moving base and pendulum, respectively. To achieve this, a pair of PID controllers is employed, as shown in Eq. 2, where $u_1 = f$ and $u_2 = \tau$ are the control signals

calculated from the errors $e_1 = x_d - x$ and $e_2 = \theta_d - \theta$ at any instant of time, using the proportional k_{p1} and k_{p2} , integral k_{i1} and k_{i2} , and derivative k_{d1} and k_{d2} gains.

$$\begin{aligned} u_1 &= k_{p1} e_1 + k_{i1} \int e_1 dt + k_{d1} \dot{e}_1 \\ u_2 &= k_{p2} e_2 + k_{i2} \int e_2 dt + k_{d2} \dot{e}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

9

Finally, the fully-actuated double pendulum (ADP) observed in Fig. 2(c) consists of a first pendulum of length l_1 with one end coupled by means of a rotating joint to a fixed base at the origin O , and the other end coupled, also by means of a rotating joint, to the end of a second pendulum of length l_2 . Both pendulums can rotate freely around the Z -axis by the motion due to the torques τ_1 and τ_2 generated by two electric motors. The state of the ADP at any instant of time t is defined as $z = [\theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$, where $\theta_1, \dot{\theta}_1$ are the angular position and velocity of the first pendulum measured from $-Y'$, and $\theta_2, \dot{\theta}_2$ are the angular position and velocity of the second pendulum measured with respect to θ_1 . This system is also affected by Earth gravity and frictional forces. Initially, both pendulums of the ADP are in stable equilibrium, i.e., $z = [0, 0, 0, 0]^T$. As in the case of the other electromechanical systems, the ADP aims to perform a position regulation task, considering a desired state of $z_d = [\theta_{1d}, \theta_{2d}, 0, 0]^T$, where θ_{1d} and θ_{2d} are the desired angular positions of both pendulums. Two PID controllers are utilized with this purpose. These are in the form of Eq. 2, where $u_1 = \tau_1$ and $u_2 = \tau_2$ are the control actions obtained with the errors $e_1 = \theta_{1d} - \theta_1$ and $e_2 = \theta_{2d} - \theta_2$ at any instant of time, using the proportional k_{p1} and k_{p2} , integral k_{i1} and k_{i2} , and derivative k_{d1} and k_{d2} gains.

B. Dynamic modeling of systems

At this point, the Euler-Lagrange method is used to derive the dynamic models of the ASP, AIP and ADP. The Euler-Lagrange method is a generalization of Newton's laws that allows obtaining the equations of motion of mechanical systems from the analysis of the potential and kinetic energies of their independent components [36].

This method can be carried out by performing the following steps for a wide variety of electromechanical systems:

1. Select the generalized coordinates that allow describing the behavior of the system at any instant of time. Usually, each generalized coordinate q_i is related to the angle θ_i or the displacement x_i of each joint in the system, considering that it has revolution or prismatic motion, respectively.
2. Calculate the total kinetic energy of the system as the sum of the kinetic energy of each rigid body that makes up the system. This is calculated from the mass m_i , the inertia I_i , the velocity of the center of mass v_i and, if applicable, the rotational velocity w_i (in motions of revolution):

$$K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i \|v_i\|^2 + \frac{1}{2} I_i w_i^2 \right) \quad (3)$$

3. Calculate the potential energy of the system due to gravity as the sum of the potential energy of each rigid body that makes it up. It is obtained from the mass m_i , the acceleration of gravity g , and the vertical component of the position of its center of mass h_i :

$$V = \sum_{i=1}^n m_i g h_i \quad (4)$$

4. Define the Rayleigh dissipation function to model non-conservative effects in the system such as frictions. For the term corresponding to each generalized coordinate q_i , the viscous friction coefficient b_i is used:

$$D = \sum_{i=1}^n b_i \dot{q}_i^2 \quad (5)$$

5. Form the Lagrangian:

$$L = K - V \quad (6)$$

6. Based on the Lagrangian, calculate the terms of the equation of motion with dissipation corresponding to each generalized coordinate q_i . In each equation of motion, the generalized input Q_i can be either a force F_i or a torque τ_i when the coordinate is related to a prismatic or a revolute joint, respectively:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (7)$$

7. Rewrite the equations of motion obtained in matrix form to facilitate their transformation to the state form.

Applying this method, the behavior of the ASP shown in Fig. 2(a) in state space for any instant of time t is described by Eq. 8, where m_1 is the mass of the pendulum, l_{c1} is the distance from the origin O to its center of mass, b_1 is the coefficient of viscous friction due to air friction, I_1 is its inertia, u is the control signal, and g is the gravity acceleration.

$$\dot{z}(z, u, t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \frac{u - m_1 g l_{c1} \sin \theta - b_1 \dot{\theta}}{m_1 l_{c1}^2 + I_1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

On the other hand, the operation of the AIP depicted in Fig. 2(b) is described in state space by the matrix equation in Eq. 9. In this equation, m_1 and m_2 are the masses of the moving base and the pendulum, respectively; b_1 and b_2 are the viscous friction coefficients associated with the motion of the mechanical components and the air friction; $u = [u_1, u_2]^T$ represents the control input; l_{c2} is the distance to the center of mass of the pendulum from O' ; I_2 is its inertia; and g is the gravity acceleration.

$$\dot{z}(z, u, t) = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \hat{M}^{-1}(u - \hat{C}\dot{q} - \hat{G}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

with:

$$\begin{aligned} q &= [x, \theta]^T \\ \dot{q} &= [\dot{x}, \dot{\theta}]^T \end{aligned} \quad (10)$$

11

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2 l_{c2} \cos \theta \\ m_2 l_c \cos \theta & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} b_1 & -m_2 l_c \dot{\theta} \sin \theta \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{G} = [0, m_2 g l_{c2} \sin \theta]^T$$

Finally, the dynamic behavior of ADP from Fig. 2(c) is established in state space by the matrix equation in Eq. 11, where m_1 and m_2 are the masses of both pendulums; b_1 and b_2 are their viscous friction coefficients related to the air friction; $u = [u_1, u_2]^T$ is the control input; l_{c1} and l_{c2} are the distance to the center of mass of each pendulum measured from the nearest end to the base; I_1 and I_2 are their moments of inertia; and g is the gravity acceleration.

$$\dot{z}(z, u, t) = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \hat{M}^{-1}(u - \hat{C}\dot{q} - \hat{G}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

with:

$$q = [\theta_1, \theta_2]^T$$

$$\dot{q} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]^T$$

$$\hat{M} = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + I_1 + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + I_2 \\ m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos \theta_2 + I_2 & m_2 l_{c2}^2 + I_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} b_1 - 2m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 & -m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_{c2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & b_2 \end{bmatrix}$$

$$\hat{G} = \begin{bmatrix} m_1 g l_{c1} \sin \theta_1 + m_2 g l_1 \sin \theta_1 + m_2 g l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ m_2 g l_{c2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

The dynamic parameters used in the above models are assumed to be known and are presented in Table 1. Details on how these dynamic models were obtained can be found at [37].

TABLE 1
PARAMETERS USED IN THE ASP AND AIP DYNAMIC MODELS.

Parameter	Value for the ASP	Value for the AIP	Value for the ADP
m_1	1.0000 (kg)	1.0000 (kg)	1.0000 (kg)
m_2	—	1.0000 (kg)	1.0000 (kg)
l_1	1.0000 (m)	—	1.0000 (m)
l_2	—	1.0000 (m)	1.0000 (m)
l_{c1}	0.5000 (m)	—	0.5000 (m)
l_{c2}	—	0.5000 (m)	0.5000 (m)
I_1	0.0050 (kg m ²)	—	0.0050 (kg m ²)
I_2	—	0.0050 (kg m ²)	0.0050 (kg m ²)
b_1	0.5000 (N m s)	0.5000 (N s/m)	0.5000 (N m s)
b_2	—	0.5000 (N m s)	0.5000 (N m s)
g	9.8100 (m/s ²)	9.8100 (m/s ²)	9.8100 (m/s ²)

C. Dynamic simulation of systems

The models of the ASP, AIP, and ADP systems are first order differential equations with initial conditions, whose numerical solution at any time instant t allows predicting their future state at instant $t + dt$, where dt is the sampling interval. Because of this, the dynamic models of the systems cannot be used directly and must go through a numerical integration process. In this work, the Euler numerical integration method, also known as *ode1*, is used due to its computational efficiency and ease of implementation in any development technology, including JS. For this purpose, a sampling interval of $dt = 0.005$ (s) is used with the objective of generating smooth simulations and smooth visualizations of the virtual electromechanical systems.

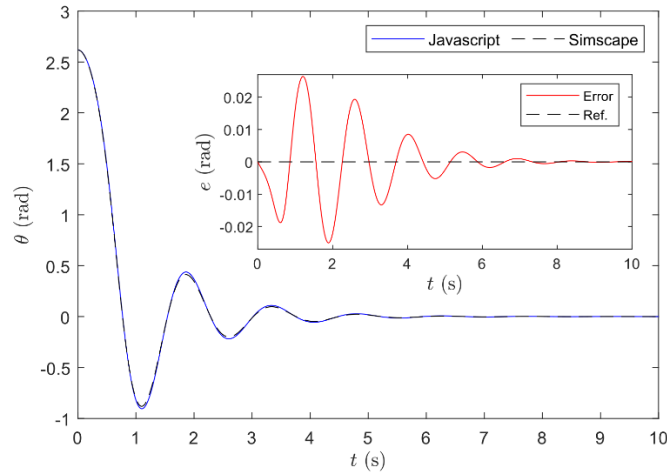
As a result of this stage, we obtain the JS code that encapsulates the computations of each dynamic model and the functionality that allows predicting the future states $z(t + dt)$ of the system, one step dt ahead in time, using *ode1*, from the current state $z(t)$ and the control input $u(t)$.

At this point, it is worth verifying that the simulations performed in JS adequately describe the behavior that would be expected in the real world of the electromechanical systems studied. To this end, JS simulations of the three systems are carried out under controlled conditions, and the results are compared with those obtained using Simscape. Simscape is a MATLAB tool that allows to graphically model multidomain physical systems using blocks, and to perform dynamic simulations of these systems. This tool is integrated with Simulink and uses advanced numerical solvers to handle differential equations of complex physical systems. Thanks to this, Simscape allows to obtain simulations with a high degree of accuracy and fidelity with respect to the real behavior of the systems.

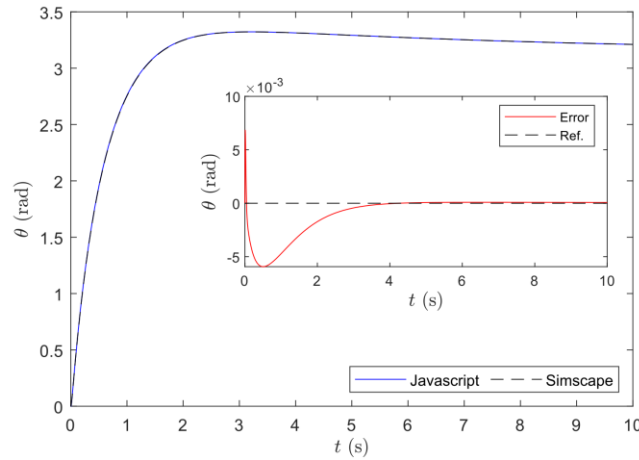
For each electromechanical system, simulations are performed considering two controlled scenarios: (1) using initial conditions far from equilibrium without the application of a control signal, in order to observe the free response of the system, and (2) using initial conditions in stable equilibrium and applying control signals for the regulation task. These comparisons allow validating that the JS implementation adequately represents the expected dynamics of the physical system. In this sense, the initial conditions used for the first scenario are: $z_0 = \left[\frac{150}{180}\pi, 0 \right]^T$ for the ASP, $z_0 = \left[0, \frac{150}{180}\pi, 0, 0 \right]^T$ for the AIP, and $z_0 = \left[0, \frac{150}{180}\pi, 0, 0 \right]^T$ for the ADP. For the second scenario, the gains of the PID controller are: $k_p = 40$, $k_i = 5$, and $k_d = 20$ for the ASP; $k_{p1} = k_{p2} = 40$, $k_{i1} = k_{i2} = 5$, and $k_{d1} = k_{d2} = 20$ for the AIP; and $k_p = 40$, $k_i = 5$, and $k_d = 20$ for the ASP; $k_{p1} = k_{p2} = 40$, $k_{i1} = k_{i2} = 5$, and $k_{d1} = 10$ and $k_{d2} = 5$ for the ADP.

Figures 3 to 5 show the results of the simulations performed in JS and Simscape for the ASP, AIP, and ADP systems, respectively, under the two controlled scenarios described previously. Each figure shows the time evolution of the positions of the moving elements of each system, allowing a direct comparison between both results. In addition, internal plots illustrate the differences between the position signals obtained from the two

simulations. In all cases, it is observed that the results obtained with the JS simulations present minimal differences with respect to those obtained by Simscape, especially during the execution of position regulation tasks. These discrepancies, for the most part, are not significant from the point of view of the overall dynamic behavior of the system. Based on these results, the simulations implemented in JS constitute an effective and sufficiently accurate alternative to represent the dynamic behavior of the electromechanical systems analyzed.

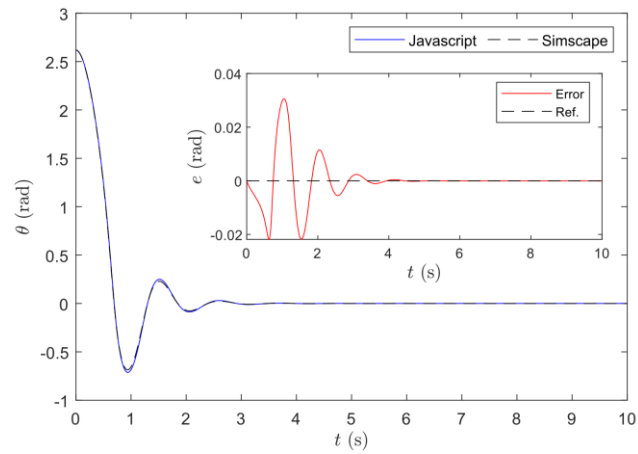
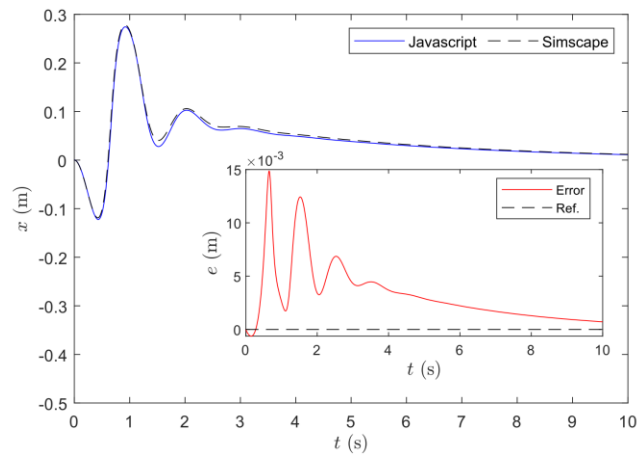


(a) Position of the pendulum under the first scenario

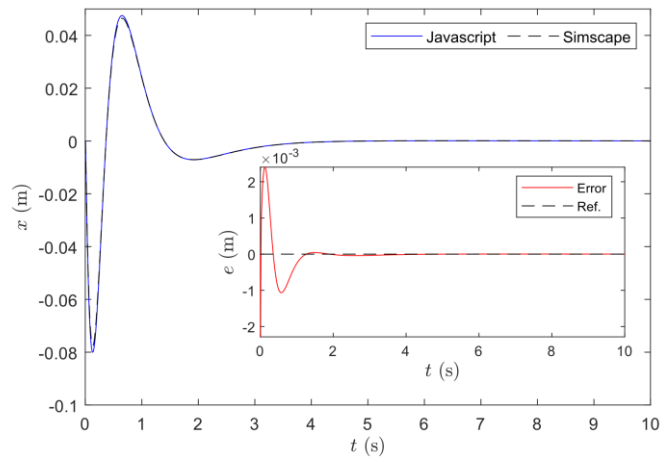


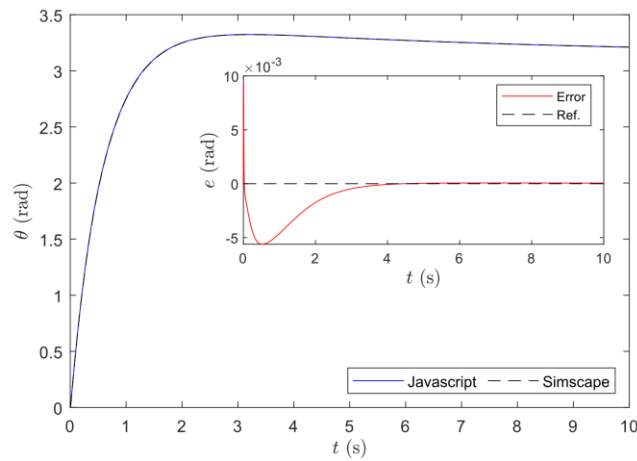
(b) Position of the pendulum under the second scenario

Fig. 3. Simulation results for the ASP under two controlled scenarios.



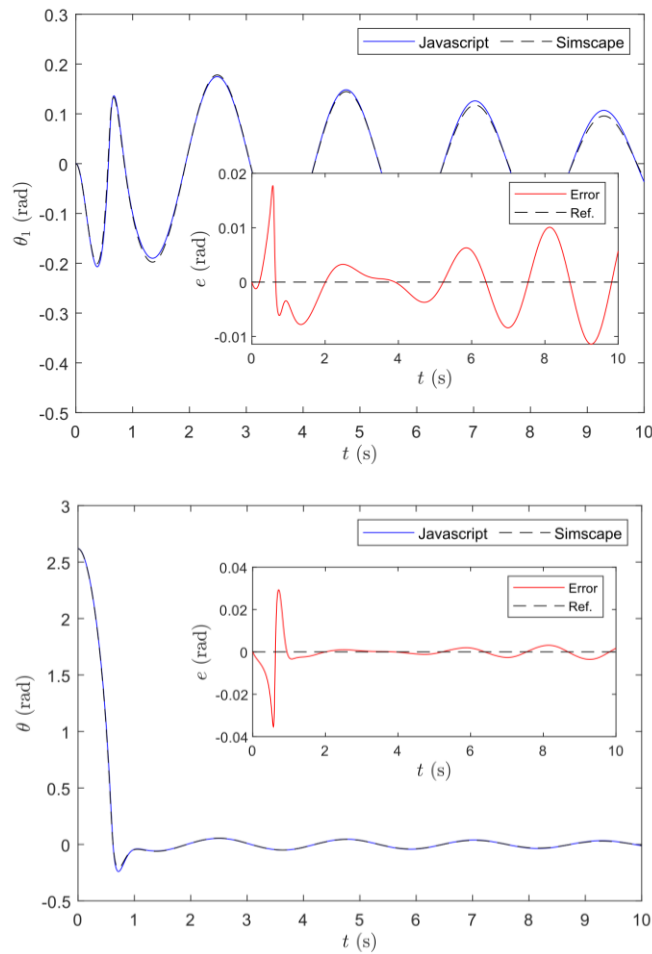
(a) Positions of the cart and pendulum under the first scenario





(b) Positions of the cart and pendulum under the second scenario

Fig. 4. Simulation results for the AIP under two controlled scenarios.



(a) Behavior of the positions of the two pendulums under the first scenario

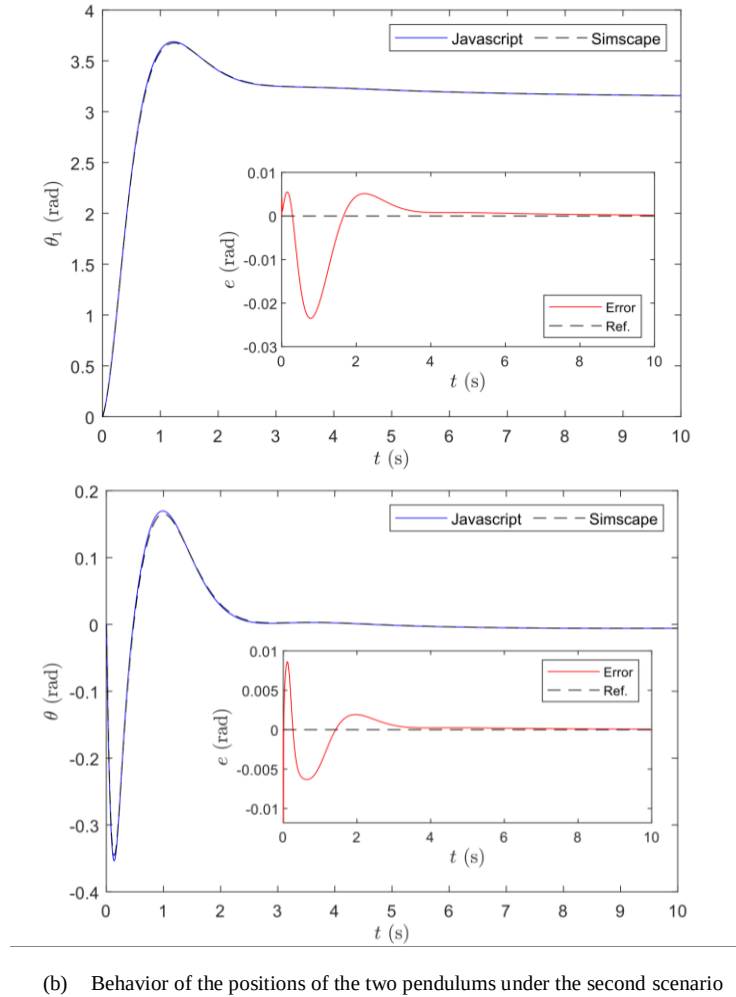
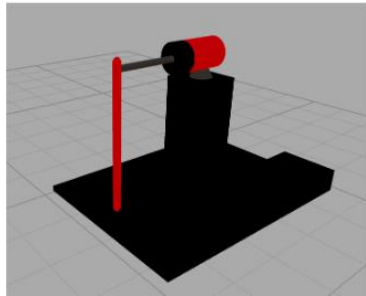


Fig. 5. Simulation results for the ADP under two controlled scenarios.

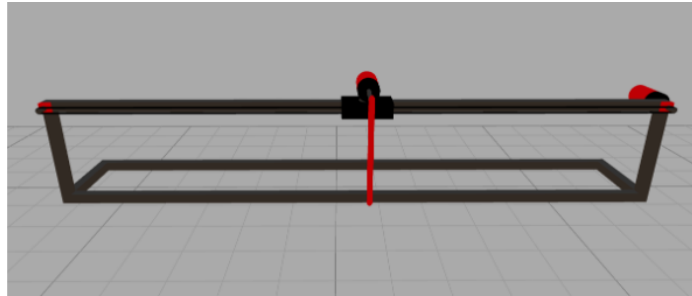
D. 3D modeling of the systems

The 3D models that visually represent the most relevant elements of each electromechanical system are shown in Fig. 3. These models were created using the free software tool Blender. In each of them, simple 3D geometries with basic materials showing only one color were used in order to reduce the computational load required to visualize them on the Web.

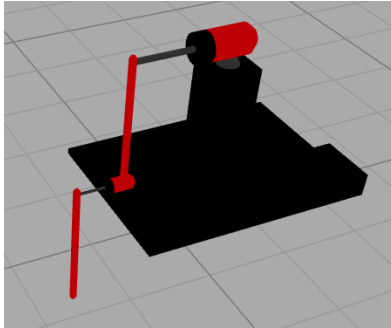
In the ASP model, shown in Fig. 6(a), the fixed base, electric motor, and pendulum are highlighted. For the AIP, illustrated in Fig. 6(b), the two electric motors, the rigid frame of the system, the pendulum, the moving base and the band that induces its motion are included. The ADP in Fig. 6(c) includes the base and the two pendulums with their respective electric motors. During the modeling of these systems, the moving elements were identified with representative names. In the case of the ASP, the only moving element is the pendulum. In the AIP, it is possible to move the base together with all the elements located on it, i.e. the pendulum and the electric motor that controls it, while in the ADP, both pendulums are moving, the second along with its electric motor.



(a) Simple pendulum



(b) Inverted pendulum



(c) Double pendulum

Fig. 6. 3D models of electromechanical systems.

E. 3D modeling of the platform

The 3D models of the ASP, AIP, and ADP systems, developed in the previous stage, are integrated into a single virtual space using Blender. In this space, other virtual objects that are familiar to users of the real platform are added. By distributing all objects, it is ensured that their dimensions, aspects and locations are consistent with reality. This arrangement of objects is shown in Fig. 7 and originates from a Web-optimized glTF file exported from Blender.



Fig. 7. 3D model of the platform.

F. Web site development

In this stage, the Web site shown in Fig. 8 is implemented, which will host the virtual platform of the electromechanical systems. Web technologies such as HTML, CSS and JS were used for its development, together with the Bootstrap and JQuery frameworks to speed up the process [38]. In the figure, several elements of the user interface can be seen, organized in a form that allows configuring different aspects of the simulation of each system, such as the initial conditions, the desired positions for the regulation task, and the control gains. In addition, buttons are included to start and stop the simulation of the systems. The user interface also features a simple navigation bar that includes a title and a button to show or hide the configuration form. Importantly, a space has been reserved in the interface for rendering the virtual platform.



Fig. 8. Personalized Web site.

G. Virtual simulation integration

In the developed Web site, the dynamic simulation code and the virtual representation of the platform are integrated and coordinated.

To handle all aspects related to the virtual space, Three.js [39], a JS library that simplifies the operations required to display and manipulate 3D graphics on the Web, is used. At this stage, Three.js is used to import the glTF file from the platform, maneuver the elements within the virtual space (such as the moving components of the virtual electromechanical systems), and manage other elements essential for the successful rendering of the virtual environment on the Web site. Among these components are the lights, which illuminate the scene to highlight the colors and textures of objects and create 3D depth perception. Other key elements are the camera and renderer. The camera acts as the viewpoint of the virtual environment, determining how the scene is projected onto a 2D surface. The renderer, in turn, uses the information from the camera to draw the 2D projection of the scene as an image within the Web site. The [Three.js editor](#) (accessed April 09, 2025) was used to preview various configurations of these elements. During the loading of the virtual platform, JS references are created for the moving elements of the ASP, AIP, and ADP, which will later be manipulated using Three.js.

The JS code that encapsulates the functionalities of the dynamic simulation of electromechanical systems is imported directly into the site. Next, scheduled tasks are created in JS for each of the systems. These scheduled tasks repeatedly call a function or code block at fixed time intervals. Within each task, first a step forward in the corresponding system dynamics, i.e., the next state of the system, is calculated. Immediately afterwards, the state information is used to adjust the positions and orientations of the moving parts in their 3D representation with the help of Three.js. In order for the changes in the virtual space to be reflected in real time, the waiting interval is set to Δt , i.e., 0.005 (s) for each system.

19

H. Implementation of interactive mechanisms

At this stage, functionality is added to the Web site to manage all user actions and interactions. The user is allowed to navigate through the virtual space and observe the behavior of the electromechanical systems from any angle. To achieve this, the camera viewpoint is adjusted using the orbital controls provided by Three.js. These controls allow orbiting (rotating around a point), zooming (zooming in and out), and panning (moving vertically or horizontally) operations.

Another functionality of the Web site allows the user to start or stop the simulation by means of two buttons. For both buttons, event handlers are implemented in JS that execute a specific task when the user presses them. When the start button is pressed, first the start button (which is originally visible) is hidden and the end button (which is initially hidden) is shown. Then, the values provided by the user through the input elements in the interface are acquired and preprocessed, i.e. transformed into numerical values, to set up the simulation that is started next. When the end button is pressed, it is hidden while the start button becomes visible again, and the update of the simulations is stopped.

I. Deployment and utilization

The Web site has been deployed on an inexpensive hosting service, and the result can be seen in Fig. 9. The platform is available to any user from an up-to-date Web browser on any computing device, at any time and from any location in [Virtual platform](#) (accessed April 09, 2025). The availability of the platform is limited only by the availability of the hosting service, which is generally active about 99% of the time.

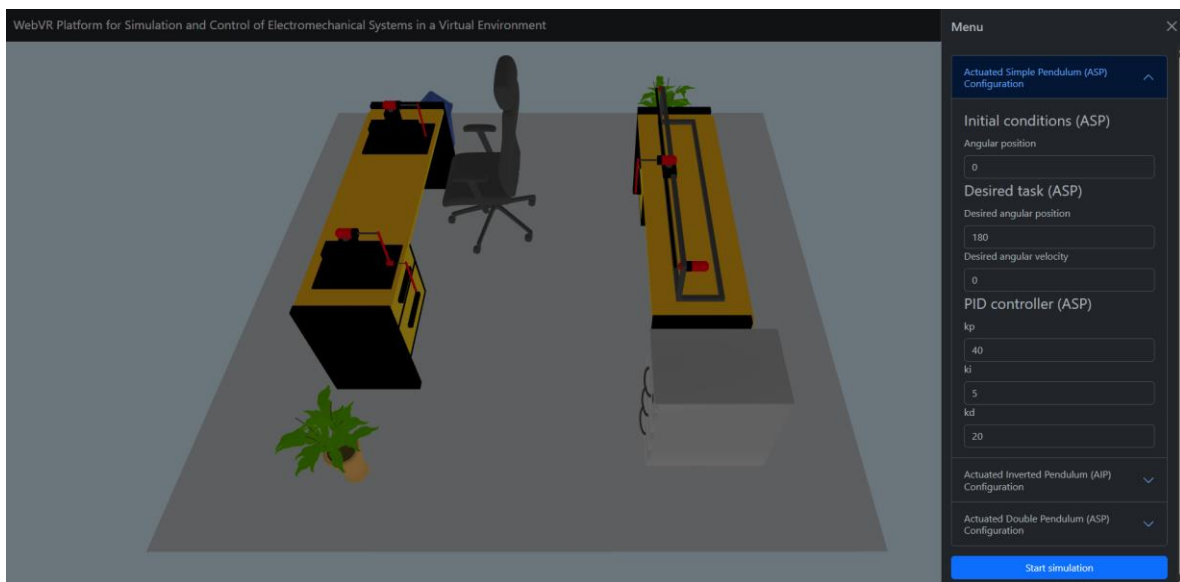


Fig. 9. Final platform deployed on a Web server.

IV. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The proposed methodology for developing virtual platforms in WebVR has proven to be effective for the simulation of electromechanical systems, such as the simple pendulum, the linear inverted pendulum, and the double pendulum, all fully actuated. The resulting virtual platform allows performing numerical simulations of these systems, considering their kinematic, dynamic and control aspects, and visualizing the results in a 3D environment that reproduces elements similar to those of the real world. This type of platform is low-cost, does not require specialized virtual reality equipment, nor the installation of additional software beyond an updated Web browser. The methodology described can be applied to the development of platforms for other types of systems.

As future work, it is planned to include a wider variety of electromechanical systems in the virtual platform. In addition, the possibility of extending the platform developed in WebVR to an extended reality environment in WebXR will be explored. Finally, we will seek to incorporate mechanisms that allow collaborative interactions within the platform.

CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: M.A. **C.-M.:** Conceptualization, Data curation, Software, Visualization, Writing -- original draft, Writing - review & editing. A. **R.-M.:** Conceptualization, Methodology, Project administration, Supervision, Writing -- original draft, Writing - review & editing. G. **H.-H.:** Investigation, Methodology, Software, Visualization, Writing -- original draft, Writing - review & editing. M. **A.-P.:** Conceptualization, Funding acquisition, Project administration, Supervision, Writing -- original draft, Writing - review & editing. M.G. **V.-C.:** Investigation, Formal analysis, Funding acquisition, Validation, Writing -- original draft, Writing - review & editing. A.B. **R.-G.:** Data curation, Investigation, Software, Visualization, Writing -- original draft, Writing - review & editing.

Acknowledgments: Authors acknowledge the support from the Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) of México.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability Statement: Data available upon request.

Funding: No external funding was received for this work.

REFERENCES

- [1] M. W. Ashraf, S. Tayyaba and N. Afzulpurkar, "Micro electromechanical systems (MEMS) based microfluidic devices for biomedical applications," *International journal of molecular sciences*, vol. 12, p. 3648–3704, 2011.
- [2] A. Murakami and S. E. Lyshevski, *Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics*, CRC press, 2018.
- [3] Z. Li, L. Zheng, W. Gao and Z. Zhan, "Electromechanical coupling mechanism and control strategy for in-wheel-motor-driven electric vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, p. 4524–4533, 2018.
- [4] E. Al-Hassan, H. Shareef, M. M. Islam, A. Wahyudie and A. A. Abdrabou, "Improved smart power socket for monitoring and controlling electrical home appliances," *IEEE Access*, vol. 6, p. 49292–49305, 2018.
- [5] R. L. Williams, D. A. Lawrence and others, *Linear state-space control systems*, John Wiley & Sons, 2007.
- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4th ed., USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [7] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, p. 818–827, 2021.

- [8] M. G. Villarreal-Cervantes, A. Rodríguez-Molina, C.-V. Garcia-Mendoza, O. Penaloza-Mejia and G. Sepúlveda-Cervantes, "Multi-objective on-line optimization approach for the DC motor controller tuning using differential evolution," *IEEE Access*, vol. 5, p. 20393–20407, 2017.
- [9] A. Rodríguez-Molina, E. Mezura-Montes, M. G. Villarreal-Cervantes and M. Aldape-Pérez, "Multi-objective meta-heuristic optimization in intelligent control: A survey on the controller tuning problem," *Applied Soft Computing*, vol. 93, p. 106342, 2020.
- [10] P. Brey, "Virtual reality and computer simulation," *The handbook of information and computer ethics*, p. 361–384, 2008.
- [11] J. Xiong, E.-L. Hsiang, Z. He, T. Zhan and S.-T. Wu, "Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives," *Light: Science & Applications*, vol. 10, p. 1–30, 2021.
- [12] N. Kapilan, P. Vidhya and X.-Z. Gao, "Virtual laboratory: A boon to the mechanical engineering education during covid-19 pandemic," *Higher Education for the Future*, vol. 8, p. 31–46, 2021.
- [13] K. H. Cheong and J. M. Koh, "Integrated virtual laboratory in engineering mathematics education: Fourier theory," *IEEE Access*, vol. 6, p. 58231–58243, 2018.
- [14] J. Gamio, "Assessing a virtual laboratory in optics as a complement to on-site teaching," *IEEE Transactions on Education*, vol. 62, p. 119–126, 2018.
- [15] J. J. Brito, P. Toledo and S. Alayón, "Virtual laboratory for automation combining inventor 3D models and Simulink control models: Virtual laboratory for automation," in *2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2018.
- [16] B. M. Mîndruț and C. A. Oprea, "Experiential Learning Through Controlling and Monitoring a Real-Time 3D House Using LabVIEW in a Virtual Laboratory," in *International Conference on Innovative Technologies and Learning*, 2020.
- [17] I. D. Wahyono, H. Putranto, K. Asfani, A. N. Afandi and others, "VLC-UM: A Novel Virtual Laboratory using Machine Learning and Artificial Intelligence," in *2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*, 2019.
- [18] J. Ramírez, D. Soto, S. López, J. Akroyd, D. Nurkowski, M. L. Botero, N. Bianco, G. Brownbridge, M. Kraft and A. Molina, "A virtual laboratory to support chemical reaction engineering courses using real-life problems and industrial software," *Education for Chemical Engineers*, vol. 33, p. 36–44, 2020.
- [19] D. A. Bastidas, L. F. Recalde, P. N. Constante, V. H. Andaluz, D. E. Gallegos and J. Varela-Aldás, "Non Immersive Virtual Laboratory Applied to Robotics Arms," in *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*, 2022.
- [20] K. W. E. Cheng and C. L. Chan, "Remote hardware controlled experiment virtual laboratory for undergraduate teaching in power electronics," *Education Sciences*, vol. 9, p. 222, 2019.
- [21] B. Hasan, Y. Al-Quorashy, S. Al-Mousa, Y. Al-Sahhaf and M. El-Abd, "V-LAB—the virtual electric machines laboratory," in *2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 2020.
- [22] S. Su, Z. Wang, S. Fu and D. Huang, "Compensation Method of Flight Simulator Visual System," in *International Conference on Human-Computer Interaction*, 2022.
- [23] M. Dombrowski, R. Buyssens and P. A. Smith, "Virtual reality training to enhance motor skills," in *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality*, 2018.
- [24] R. Pasteka, J. P. Santos da Costa, N. Barros, R. Kolar and M. Forjan, "Patient–Ventilator Interaction Testing Using the Electromechanical Lung Simulator xPULM™ during V/AC and PSV Ventilation Mode," *Applied Sciences*, vol. 11, p. 3745, 2021.
- [25] S. C. Ferreira, R. O. Chaves, M. C. d. R. Seruffo, A. Pereira, A. P. D. S. Azar, Â. V. Dias, A. d. A. S. d. Santos and M. V. H. Brito, "Empirical evaluation of a 3D virtual simulator of hysteroscopy using Leap Motion for gestural interfacing," *Journal of Medical Systems*, vol. 44, p. 1–10, 2020.
- [26] E. B. S. Lustosa, D. V. de Macedo and M. A. F. Rodrigues, "Virtual simulator for forklift training," in *2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, 2018.
- [27] O. A. Aguirre, J. C. Ñacato and V. H. Andaluz, "Virtual simulator for collaborative tasks of aerial manipulator robots," in *2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2020.

- [28] R. Badarudin and D. Hariyanto, "Visual validation of PLC program using virtual simulator," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021.
- [29] C. Li, L. Fu and L. Wang, "Innovate engineering education by using virtual laboratory platform based industrial robot," in *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 2018.
- [30] A. A. Sutchenkov and A. I. Tikhonov, "Electrical engineering materials virtual laboratory," in *2018 IV International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*, 2018.
- [31] J. M. Ramírez-Romero and S. Rivera-Rodríguez, "Characteristics and functions of a virtual laboratory of induction machines in the teaching environment," *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 13, p. 130–135, 2018.
- [32] L. Ljung, "System Identification," in *Signal Analysis and Prediction*, A. Procházka, J. Uhlíř, P. W. J. Rayner and N. G. Kingsbury, Eds., Boston, MA: Birkhäuser Boston, 1998, p. 163–173.
- [33] T. Mullen, *Mastering blender*, John Wiley & Sons, 2011.
- [34] A. Ranjan, A. Sinha and R. Battewad, *JavaScript for modern web development: building a web application using HTML, CSS, and JavaScript*, BPB Publications, 2020.
- [35] M. A. Johnson and M. H. Moradi, *PID control*, Springer, 2005.
- [36] K. Ogata, *System dynamics / Katsuhiko Ogata*, 4th ed. ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004.
- [37] A. Rodríguez-Molina, J. Solís-Romero, M. Á. Paredes-Rueda, C. A. Guerrero-León, M. E. Mora-Soto and A. H. Herrera, "Exploiting evolutionary computation techniques for service industries," in *Evolutionary Computation with Intelligent Systems*, CRC Press, 2022, p. 153–179.
- [38] P. Hong, *Practical web design: Learn the fundamentals of web design with HTML5, CSS3, bootstrap, jQuery, and vue. js*, Packt Publishing Ltd, 2018.
- [39] B. Danchilla and B. Danchilla, "Three. js framework," *Beginning WebGL for HTML5*, p. 173–203, 2012.

Preparation pressure effects on proposed thermoluminescent gamma radiation detectors fabricated from single wall carbon nanotubes (SWCNT)

Análisis de los efectos de la presión de fabricación de pastillas de nanotubos de carbono de pared simple como posible detector termoluminiscente de radiación gamma

Alejandro Ortiz Morales¹, Jaime Ortiz López², Benjamín Leal Acevedo³, Ramón Gómez Aguilar⁴

Instituto Politécnico Nacional,
Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Ciudad de México, MÉXICO

¹ORCID: 0000-0002-6897-0789 | alortizm@ipn.mx *Corresponding author

Escuela Superior de Física y Matemáticas, Ciudad de México, MÉXICO

²ORCID: 0000-0002-9958-619X | jortizl@ipn.mx

⁴ORCID: 0000-0002-5945-5929 | rgomez@ipn.mx

Universidad Nacional Autónoma de México,
Instituto de Ciencias Nucleares, Unidad de Irradiación y Seguridad Radiológica, Ciudad de México, MÉXICO

³ORCID: 0009-0005-4464-892X | benjamin.leal@nucleares.unam.mx

Recibido 26/03/2025, aceptado 25/06/2025.

Abstract

Single wall carbon nanotube (SWCNT) pellets have been manufactured at pressures of 1, 2.5 and 5 Tons, and later exposed to gamma photons from a Co⁶⁰ source to study their thermoluminescent (TL) properties. SWCNT were synthesized by the electric arc discharge technique and pellets were characterized with Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The effective atomic number (Z_{eff}) of these pellets has a value of 15.08 like the one of human bones. The pellets were exposed to a gamma irradiation dose ranging from 1.0 to 100 [kGy]. The kinetic parameters, activation energy E , frequency factor s , kinetic order b , are obtained from a structure of glow curve using deconvolution and heuristic equations (Chen, Lushchik, Balarin, etc.) give us information of the mechanisms responsible of the TL signal in SWCNT-pellets, which is due to recombination of electron-hole pairs. The main glow peak is observed at 452, 465 and 477 K, in samples A, B and C, respectively. As preparation pressure pellets increases, activation energy decreases for all traps in the samples, indicating the creation of defects in the SWCNT structure. Three stages are displayed in the TL dose-response for all samples, and linearity was maintained up to 2.5 kGy. Thermoluminescence, X-RD, scanning electron microscopy and Raman scattering, analyses show that pellet A is a promising high radiation detector.

Index words: single wall carbon nanotube pellets, thermoluminescence, scanning electron microscopy, pellet preparation pressure, X-ray diffraction, Raman spectroscopy, radiation gamma detector.

Resumen

Pastillas de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) se fabricaron a las presiones de 1, 2.5 y 5 toneladas, posteriormente se irradiaron con fotones gamma de una fuente de Co⁶⁰ con el objetivo de estudiar sus propiedades termoluminiscentes (TL). Los nanotubos de pared simple se sintetizaron mediante la técnica de descarga de arco eléctrico y se caracterizaron con espectroscopia Raman, difracción de rayos X (D R-X) y microscopía electrónica de barrido (SEM). El número atómico efectivo (Z_{eff}) de los nanotubos tiene un valor de 15.08 similar al de los huesos humanos. Las pastillas se expusieron a una dosis de irradiación gamma que variaba de 1.0 a 100[kGy]. Los parámetros cinéticos, energía de activación E , factor de frecuencia s , orden cinético b , se obtienen a partir de la estructura de la curva de brillo usando deconvolución y ecuaciones heurísticas (Chen, Lushchik, Balarin, etc.) que brindan información de los mecanismos responsables de la señal TL en las pastillas de SWCNT la recombinación de pares electrón-hueco. El pico de brillo principal está localizado a 452, 465 y 477 K, en las muestras A, B y C, respectivamente. Conforme aumenta la presión de fabricación, la energía de activación disminuye para todas las trampas en las muestras, lo que indica la creación de defectos en la estructura de los nanotubos de carbono de pared simple. Se muestran tres etapas en la respuesta TL-dosis para todas las muestras, y la linealidad se mantuvo hasta 2.5 kGy. Los análisis con termoluminiscencia, difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido y dispersión Raman muestran que la pastilla A es un detector de radiación gamma, prometedor en el intervalo de dosis analizado.

Palabras clave: nanotubos de pared simple, termoluminiscencia, microscopía electrónica de barrido, presión de preparación de pastillas, difracción de rayos X, espectroscopia Raman, detector de radiación gamma.

I. INTRODUCTION

A vast variety of materials such as PPV-polymer derivative films and doped metallic oxides have been analyzed with luminescence heat stimulation, aiming to their use as thermoluminescent (TL) detectors [1][2][3]. Recently, SWCNT in powder form was shown to exhibit thermoluminescent properties [4]. In recent years [5] manufacture TL material, $\text{CaSO}_4 \cdot \text{X}$, where X: Rare earths, such as: Dy, Tm, Eu, in pellets form, have been proposed for TL dosimeters for their properties such as: reproducibility, linear dose response, low fading of the TL signal, etc. Mathur *et al* [6], analyzed $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Dy}$ -pellets, using TL-phenomenon concluding; molar concentration of 1 and 2 %, coadyuvate notably in the TL curve (peaked at 335 and 475 °C) increasing the range of dose (100- 500 kGy). Tarawneh *et al* [7], realized studies with hybrid carbon nanotubes and montmorillonite nanocomposites, improve physical properties and optimize the effect of gamma dose until 150 kGy. Sobczak *et al* [8], used multiwall carbon nanotubes (MWCNT) to manufacture MWCNT/paraffin nanocomposites finding that high concentration of CNTs and iron encapsulates magnify the response before gamma radiation fields. The excellent response of SWCNTs to high doses of gamma radiation represents a valuable opportunity for technological applications. The SWCNT-pellets could be interesting for measuring doses at gamma irradiation plant in which services are done to ensure the debacterization, sanitization and safety of various products such as dehydrated foods, medical-disposable devices, pharmaceuticals, cosmetics, herbalists, etc. Gamma irradiation is one of the most effective procedures for food preservation, comparable to pasteurization, canning or freezing. The nature of this radiation energy breaks the DNA chains of harmful microorganisms and manages to pass through the packaging of the product without altering its internal or external structure [9]. Carbon nanotube-based devices are excellent candidates for lightweight personal dosimeters. They are highly sensitive sensors, display particularly low power consumption [10] and have already shown promising applications in X-ray dosimetry [11]. Chemical functionalization of SWCNT can be used to increase a sensor's physical and chemoselective sensitivity. There has been substantial effort in the functionalization of SWCNTs to alter both their electronic properties and dispersibility as well as to obtain desirable properties for radiation sensing [12][13]. In the interest of developing real time, memory free sensors, radiation tolerance of the sensing material is a key factor. It has been demonstrated previously that unfunctionalized SWCNT's are radiation tolerant, [14] [15] because of the inherent strength of the aromatic C-C bonds. Depending on physical state (powder, pellets or buckypaper) it can establish a linearity range for commercial use like a TL-detector of high dose rate fields.

Gspann *et. al* 2018 [16], reports during tensile test of SWCNT, triboluminescence flashes occurring at the fracture sites that depend on the sample morphology caused by charge separation due to SWCNT bond fracture and gas discharge of the surrounding gases. Before SWCNT pellets are exposed to a source of ionizing radiation, triboluminescence has already occurred. For SWCNT material, the ratio between the conducting and semiconducting CNT is 1:2 and that semiconducting species show a band gap with an energy depending on diameter/chirality ratio. In SWCNTs were found to emit light from interband recombination of electron-hole pairs [17].

The objective of this paper is to analyze the effect of different manufacturing pressures on SWCNT pellets and to correlate these conditions with TL kinetic parameters (activation energy E , frequency factor s and kinetic order b) to evaluate their application like a gamma ray detector.

II. METHOD

Single wall carbon nanotubes (SWCNT) were synthesized at the (IPN-ESFM) with a modified electric arc discharge technique [18] under hydrogen atmosphere (200 Torr) using the following catalytic mixture in powder form: of C/Ni/Co/Fe/FeS in 95.25/2.6/0.7/0.7/0.75 molar concentrations, respectively. With this technique and catalytic mixture composition, SWNT are synthesized with diameters in the 1 to 2 nm range. Briefly, a DC current of 150 A is supplied by a 22.8 kVA commercial arc welding equipment externally connected to a bell jar evaporator which is used as a growth chamber. Inside the bell-jar an electric arc discharge is maintained between the tip of a sharpened graphite cathode and an anode formed by the catalytic mixture. These powders are compressed inside cavities carved on a supporting graphite block. The cathode is placed with an inclination of about 60° above the filled cavities so that the plasma jet of the discharge is deviated towards the empty volume of the growth chamber. After the discharge is triggered, SWCNT bundles are obtained in the form of a black web-like material that grows and hangs from objects inside the chamber and as a fluffy black film deposited on the chamber walls. Pellets designated as A, B and C were made with a manual hydraulic press with SWCNT initially in powder form applying 1, 2.5 and 5-ton pressure, respectively, at room temperature and 1atm. The black colored disk-shaped pellets are 5 mm in diameter

0.5 mm in thickness and 30 mg in weight. Annealing treatments were performed by heating the samples at 770 K for 1 h and then dropping them onto a copper block at room temperature (RT). The pellets were exposed to gamma photons from ^{60}Co irradiator (Gammabeam 651-PT) with a 152 Gy/min dose rate at the Nuclear Science Institute-UNAM facilities. Dosimetric characterization was also performed in UNAM with a Harshaw TLD model 3500 TL reader system at a constant heating rate of 2 K/s under nitrogen atmosphere to eliminate any spurious signals.

SWCNT-pellets were characterized by scanning electron microscopy (SEM). Using a JSM-7900 F instrument at the Centro Nanociencias and Micro-Nanotecnologías of IPN (IPN-CNMN) operated at 1.5 kV with secondary electrons. XRD patterns were obtained with a PANalytical diffractometer, model X Pert PRO MRD using Cu-K α radiation ($\lambda = 1.5404 \text{ \AA}$) operated at 45 kV and 40mA at IPN-CNMN. Raman scattering spectroscopy characterization was performed also at IPN with a Horiba Jobin Yvon LabRaman HR-800 instrument with 633 nm (1.958 eV) excitation.

III. RESULTS

A. Scanning electron microscopy(SEM) of SWCNT pellets

Fig.1 Shows a SEM image of bundles of SWCNT's synthesized by electric arc discharge before the fabrication of pellets. As shown elsewhere [18], the synthesized material consists of SWCNT's with diameters in the range of 1 to 2 nm. Figure 1 shows, however, that the SWCNTs actually cluster into bundles made up of different numbers of individual SWCNTs, giving the bundles a wide distribution of diameters. The table indicates measured lengths of various bundles identified by index numbering 1 to 11. Also shown is a magnified view of one of these bundles indicating a measured diameter of 0.066 μm surrounded by other SWCNT bundles having different diameters. The measured bundle is formed by about 30 to 60 individual SWCNTs.

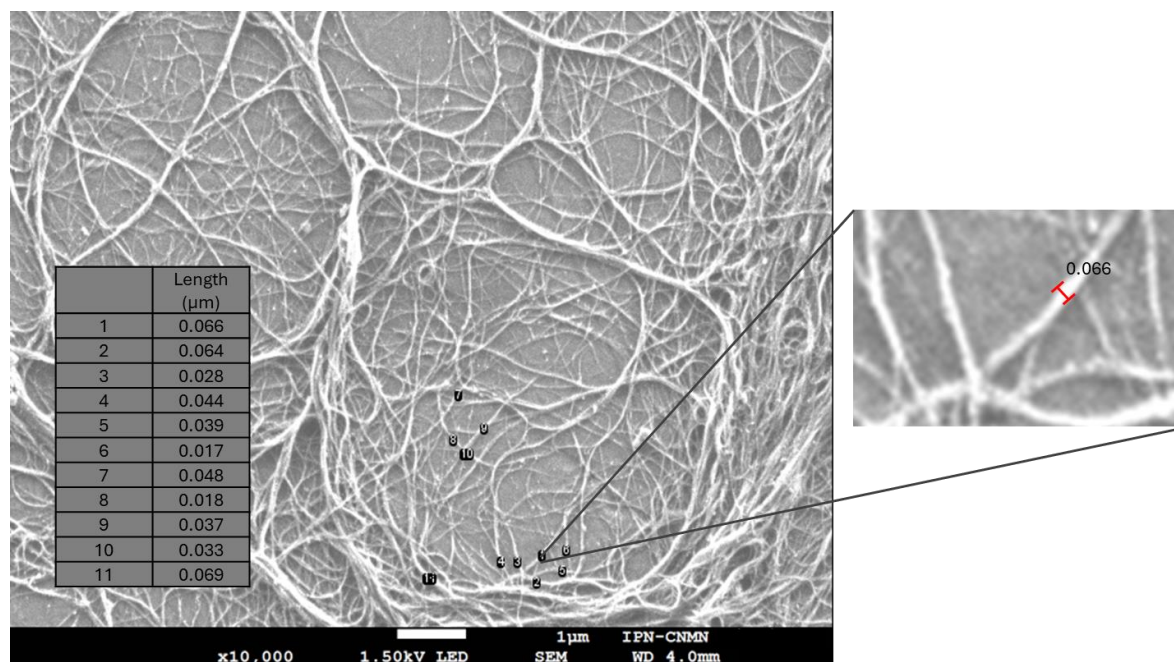


Fig. 1. SEM image of bundles of synthesized SWCNT as produced with electric arc discharge technique [18]. Individual SWCNT of 1 to 2 nm diameter cluster into bundles formed by different numbers of SWCNTs resulting in bundles with a wide distribution of diameters. Magnified view of a selected bundle of 0.066 μm diameter.

B. X-ray and Raman characterization of SWNT pellets

Diffraction patterns of pellet A before and after gamma-ray exposure are shown in Fig. 2. Both patterns are normalized to the most prominent peak (P1) intensity around $2\theta = 26.4^\circ$ which is identified as the (002) reflection of graphitic materials with hexagonal crystalline structure. Other peaks expected from sp^2 carbons are (101) and (004) reflections which are coincident with peaks P2 and P4, respectively. The weakest peak P3 main contributions are due to the presence of catalytic metal residues, mainly Ni and Ni, Fe and Co carbides. Other catalytic metal residues (Fe, Ni, Co),

their carbides and alloys, may also contribute to all P1-P4 peaks as shown in the lower part of Fig. 2 where the position of diffraction peaks (as reported in the indicated JCPDS-PDF cards) of phases expected to be present in the sample are indicated. Peak positions for carbon nanotube bundles, as reported in [19] and JCPDS 00-058-1638 (CNT in Fig. 2), are also consistent with our measured patterns. Due to the disordered state of compressed SWCNT bundles and heterogeneous nature of the sample, diffraction peaks are inhomogeneously broadened and difficult to analyze for strict phase identification and quantification. The slight increase in the background signal for the irradiated sample, is presumably due to defect formation and partial amorphization of the sample by gamma-rays, otherwise the diffraction peaks remain nearly unaffected before and after irradiation. Because the diffractograms of all samples are almost identical, we only show the most significant ones.

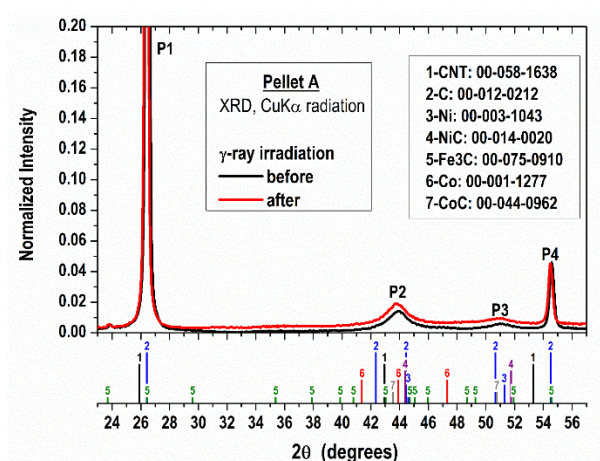


Fig. 2. X-ray diffraction patterns (normalized with respect to intensity of peak P1) of pellet A before and after gamma-ray irradiation. Vertical scale is chosen so that smaller peaks are adequately recognized. The position of diffraction peaks of phases expected to be present in the sample are shown in the lower part, according to the indicated JCPDS-PDF database cards.

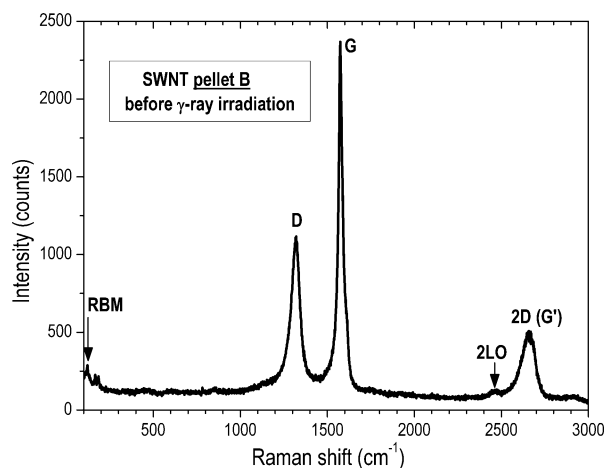


Fig. 3. Raman spectrum of the non-irradiated compressed pellet B prepared with 2.5-ton pressure.

5

As shown in Fig. 3 a typical Raman spectrum of pellet B before irradiation. Spectra taken at different points on the surface of the pellet do not exhibit great differences in spectral features. A series of weak peaks corresponding to radial breathing modes (RBM) of SWCNTs are observed at low frequency. The most prominent around 122 cm^{-1} corresponds to SWCNTs with $\sim 2.08\text{ nm}$ diameter (calculated with $\omega_{\text{RBM}} = 234/d + 10$ where ω_{RBM} is in cm^{-1} and d in nm, see Shimada, et. al., 2005) [20] which are expected to be semiconducting SWCNTs. The peak around 1320 cm^{-1} is the so-called disorder-induced D band associated with structural defects and deformations of the SWNT bundles. The band located around 1580 cm^{-1} , known as the G band, is associated to tangential vibrational modes of the SWCNT. At high frequency, second order Raman bands around 2450 and 2650 cm^{-1} are assigned to overtone modes: the first to a LO phonon mode (2LO), and the second to the overtone of the D band (2D also known as G'), respectively. It should be noted that the Raman spectra of raw synthesized SWNT in powder form [18] shows no evidence of the 2LO band, and the D band is weaker with respect to G band intensity, with a ratio I_D/I_G in the range 0.20 to 0.25. In the compressed pellets, however, the intensity of the D band is enhanced, the I_D/I_G ratio increases to ~ 0.45 . In addition, G band in raw SWCNT clearly shows a shoulder at low frequency due to splitting of tangential modes (known as G- and G+ bands) along the axis and on the perimeter of SWCNT [18]. This splitting of G band is not observed in the spectrum of the compressed SWCNT pellet of Fig. 3. The described changes of the Raman spectrum of SWCNT in the compressed pellet with respect to the ones observed in powder form reflects the state of stress and deformation that the SWCNT are subjected which is expected to depend on the pellet preparation pressure.

C. Thermoluminescent properties

The TL-signal is not enhanced as increasing pellet preparation pressure as shown in Fig. 4. The largest TL intensity of $13 \times 10^4 [\text{nC}]$ occurs for sample A, while for pellet B and C, the values were $34 \times 10^4 [\text{nC}]$ and $1 \times 10^4 [\text{nC}]$ respectively. Maximum TL response for all samples was found at 50 kGy. This indicates that with increasing pellet preparation pressure an increasing number of defects are created generating a decrease in the TL response. Therefore, C-C bonds in nanotubes are destroyed by energetic gamma photons generating defects. Once a critical defect concentration is reached, annihilation of defects may be energetically favourable. This process compensates for further defect generation and leads to the constant defect concentration even though irradiation doses increase. It is likely that the irradiation causes the formation of bonds between nanotubes, fixing their mutual positions [21].

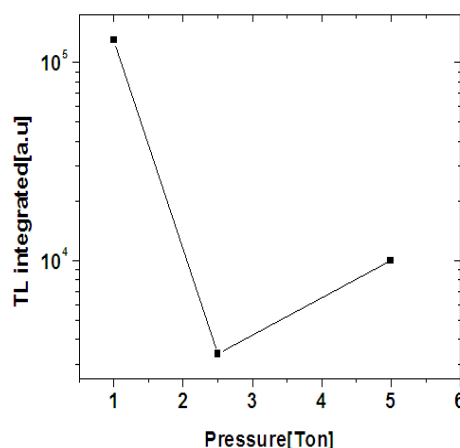


Fig. 4. TL-signal of pellets as function of preparation pressure.

- 1) Calculating kinetic parameters using computerized glow curve deconvolution (CGCD), peak shape and heuristic equations

The glow curves of samples A, B and C are composed of a broad peak between 350-500 K at different gamma doses and peaked at approximately in the 440–480 K range (Fig. 5.a, 5.b), evidently, it is not a single peak but rather a convolution of 3-4 peaks.

The maximum peak temperature (T_m) of the glow curves varying as function of dose and preparation pressure. At 50 kGy, is observed for preparation A, for a dose of 100 kGy, is exhibited for preparation B. A contrary effect is exhibited for sample C, as irradiation dose increase TL signal decrease, this behavior indicates the manufacturing pressure, impact in the number of defects and therefore in the intensity of TL response. This behavior could suggest that a continuous trap distribution occurred instead of a single trapping level responsible for the TL radiative emission [22]. The combination of irradiation-dose and preparation pressure modify trapping states. Therefore, are necessary carryout different methods for obtained kinetic parameters. In this case, CGCD, geometrical methods and heuristic equations will be used.

6

The glow curves in figure 5.a, 5.b were analyzed considering the general-order kinetics (GOK) model, which is most adequate because the samples exhibit a complex luminescence glow emission. However, there are other possibilities [23] to analyze the trapped charge distribution assuming a Gaussian or exponential distribution due to the thermal release of charge carriers from the trapping centers. Trap depths responsible for these peaks are correlated with energy states characterized by kinetic parameters such as: activation energy (E [eV]), frequency factor (s [s^{-1}]) and kinetic order (b). A decomposition of glow curves in individual glow peaks gives information about these parameters. The next equation has been modified according to the following glow peak algorithm:

$$I(T) = I_M (b)^{\frac{b}{b-1}} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_M}{T_M}\right) \left[(b-1)(1-\Delta) \frac{T^2}{T_M^2} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_M}{T_M}\right) + Z_M \right]^{\frac{-b}{b-1}} \quad (1)$$

Where I_M and T_M are the TL peak maximum intensity and peak maximum temperature, respectively, E (eV) the activation energy, b the kinetic order, and $\Delta_M = \frac{2kT_M}{E}$, $\Delta = \frac{2kT}{E}$ and $Z_M = 1 + (b-1)\Delta_M$, with the pre-exponential factor given by $s = \frac{\beta E}{kT_M^2} \frac{1}{Z_M} \exp\left(\frac{E}{kT_M}\right)$. The curve fitting procedure was performed using the goodness of fit tested with a figure of merit (FOM) with a value equal or less than 5 % means a very good fit [24].

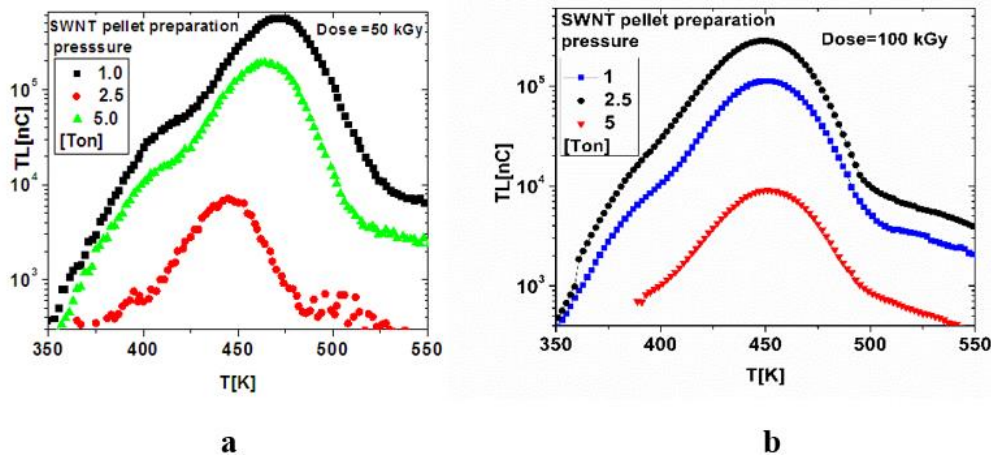


Fig. 5. Glow curves of SWCNT-pellets.

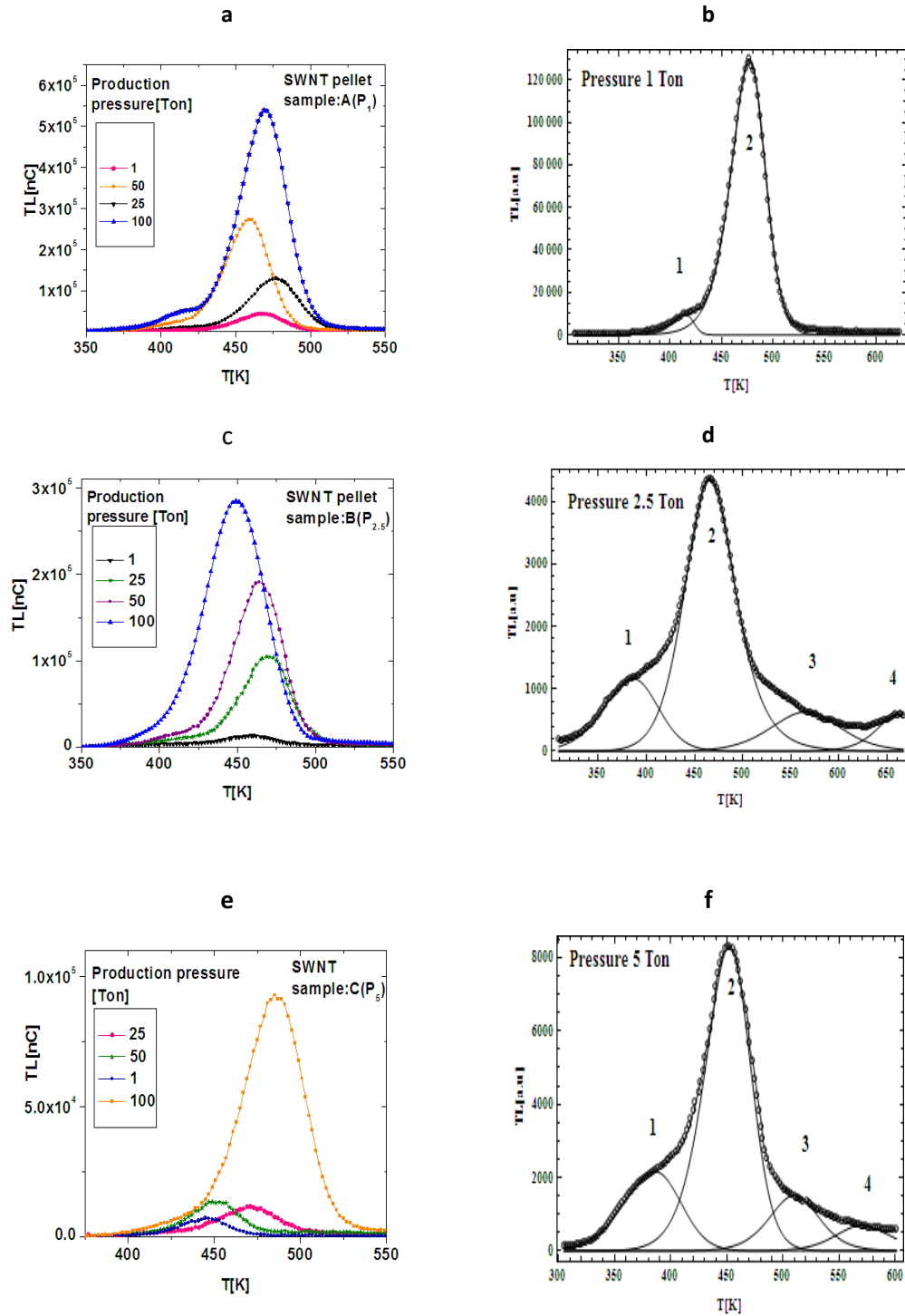


Fig. 6. Glow curves of SWNT-pellets, prepared at 1, 2.5 and 5 Ton. The doses were 1, 25, 50 and 100 kGy, 6.b, 6.d, 6.f) Computerized glow curve deconvolution (CGCD) using a general order model, the experimental glow curves (open circles) at delivered dose of 1 kGy..

From figures: 6.b, 6.d and 6.f, for all samples, the deconvoluted peaks #2, are in the temperature range 452–477 K and showed stability as a function of the dose, therefore peak #2 is chosen as main peak. In TL-dosimetry for personal, environmental, or clinical applications, a dosimetric peak generally lies in the 420–523 K temperature region [26] Trap activation energy have values in the 0.5–2.0 eV range for all samples. The deconvoluted first glow peak #1 has an activation energy 1.71 eV (pellet A), 0.5 eV (pellet B), and 0.5eV (pellet C) and correspond to the lower temperatures side (383–414 K) of the glow curves. The fourth peak #4 is assumed just to improve the FOM, but it has no physical meaning in pellets B and C. The kinetic parameters (activation energy E [eV] and frequency factor s [s^{-1}]) of the pellets are listed in Table 2. For sample B, deconvoluted peak #2 is located at 452 K and has a kinetic order parameter (b) close to 2, indicating that trapping and re-trapping are the responsible process. As the manufacturing pressure of the SWNT pellets increases, the activation energy of the main peak decreases for all samples.

Summary of values of TL-signal and pellet preparation pressure. There is no linear correlation between preparation pressure and TL-signal. Preparation pressure effects on pellets is strongly marked on glow curve structures Fig. 5(a)-Fig. 5(b), with increasing preparation pressure, more energy states of traps are generated.

TABLE 1
PREPARATION PRESSURE DEPENDENCE OF TL-SIGNAL PARAMETERS.

Pellet	Preparation pressure [Ton]	Integrated TL signal [nC]	Deconvoluted glow peaks	Activation energy[eV] Peak 2
A	1	13×10^4	2	1.51
B	2.5	34×10^4	4	0.96
C	5	1.0×10^4	4	0.85

TABLE 2
KINETIC PARAMETERS AS OBTAINED BY THE COMPUTERIZED GLOW CURVE DECONVOLUTION (CGCD) USING GENERAL ORDER ALGORITHM.

Sample A (1 Ton)			FOM=0.05			
Peak	T[K]	E[eV]	b	s[s^{-1}]	α	R
1	414	1.71	1.20	1.62E+20		
2	477	1.51	1.51	1.71E+15	0.85	0.25
Sample B (2.5 Ton)			FOM=0.03			
Peak	T[K]	E[eV]	b	s[s^{-1}]		
1	385	0.50	1.30	264205		
2	452	0.96	1.90	2.95E+09	1	0.75
3	510	0.93	1.59	1.44E+07		
4	570	2.06	1.01	6.91E+14		
Sample C (5 Ton)			FOM=0.03			
Peak	T[K]	E[eV]	b	s[s^{-1}]		
1	383	0.5	1.22	291850		
2	465	0.85	1.36	1.84E+08	0.7	0.15
3	535	1.09	1.99	1.58E+09		
4	660	1.12	1.01	2.51E+10		

Peak #2 is a main peak.

The relationship among the α -values and b (kinetics order) showed that the overall scattering of the values found for b corresponding to any value found of α was within $\pm 10\%$ approximately [26]. The α -values for peak #2 of samples A, B and C were found to be in the 0.7–1.0 range. The activation energy values obtained with deconvolution for peak #2 are ranging between 0.85 to 1.5 [eV] (See Table 2), suggesting a possible good stability of the trapped charges produced during irradiation [26]. From new equations [27] a numerical relationship among b (kinetic order) and R has been established; where $R = \frac{A_n}{A_m} < 1$; and A_m recombination probability and A_n trapping probability.

The numerical value of R for samples A, B and C are in the 0.15 to 0.75 range concluding than trapping is a predominant process in glow curves of the analyzed samples. From kinetic parameters in Table 2, the values of b are different, for each sample, indicating the strong effect of manufacturing pressure in the kinetic order. Particularly, in the sample B, where b is almost two. Concluding, the preparation pressure of pellet C (5 Ton) changes the kinetic order. The activation energy values obtained from geometrical methods, are useful to comparing with deconvolution and dilucidated other mechanisms responsible of TL signal.

The value obtained of

$$\mu_g = \frac{\delta}{\omega} = \frac{T_2 - T_M}{T_2 - T_1} \dots (2) \text{ another important parameter is, } \tau = T_M - T_1.$$

Then equation is given by:

$$E_\alpha = c_\alpha \left(\frac{kT_M^2}{\alpha} \right) - b_\alpha (2kT_M) \quad (3)$$

Where α can be τ or ω and b_α , c_α has the next expressions:

$$\begin{aligned} b_\tau &= 1.58 + 4.2(\mu - 0.42), & c_\tau &= 1.51 + 3.0(\mu - 0.42), \\ b_\delta &= 0, & c_\delta &= 0.976 + 7.3(\mu - 0.42), \\ b_\omega &= 1.0, & c_\omega &= 2.52 + 10.2(\mu - 0.42), \end{aligned}$$

where, k : Boltzmann constant = 8.617×10^{-5} eV/K

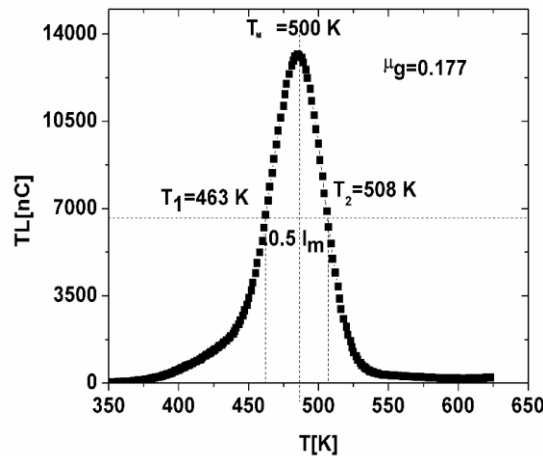


Fig. 7. SWCNT glow curve pellet and temperatures associated to geometrical method.

From Fig. 7 are obtained the geometrical values of α , τ , ω and μ_g to calculate activation energy using Chen, Grosswiener equations etc., and geometric factor respectively. These values are summarized in the next table.

From Table 3, is noticeable than value of activation energy(E) for peak 2, follows a first order kinetic for samples A and C, but in the case of sample B, is a second order, furthermore μ_g is independent of E , in the range from 0.1 to 1.6 eV.

TABLE 3
RESUME OF ACTIVATION ENERGY E AS OBTAINED AS BY PEAK SHAPE METHOD AND HEURISTIC EQUATIONS, FOR PEAK TWO.

Author	Equation	Sample A E[eV] $\mu_g=0.44$	Sample B E[eV] $\mu_g=0.475$	Sample C E[eV] $\mu_g=0.45$
Grosswiener	$E = 0.0462 * \tau$	1.2936	0.9702	1.0164
Lushchik	$E = 0.0649 * \delta$	1.4278	1.2231	1.1684
Balarin	$E = 0.0271 * \omega$	1.355	1.084	1.084
Chen	3	1.2838 1.3101 1.3054	1.3167 1.3276 1.3311	1.0786 1.1025 1.0976

2) TL-dose response and linearity and non-linearity analysis

Three stages are displayed in the TL dose-response shown in Fig. 8. Linearity is observed up to 25 kGy (stage 1), and TL response increases between 20 to 50 kGy in stage 2. It seems that in stage 2, new traps are generated as consequence of the amount of irradiation. The TL response as function of dose for sample C exhibits a complex behavior from 50-100 kGy. The first action to understand the behavior of TL-dose response curve of a material is to find if TL of the material grows linearly as a function of dose. To carry out this action, we make use of an index called supralinearity $f(D)$ which is given by the relation:

$$f(D) = \frac{M(D)/D}{M(D_L)/D_L} \quad (4)$$

$$\text{where, } M(D) = M_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{D}{E01}\right) \right] + M_2 \left[1 - \left(1 + \frac{D}{E02}\right) \exp\left(-\frac{D}{E02}\right) \right] \quad (5)$$

Here M_1 , M_2 are the TL signal contribution of each saturating exponential and $E01$, $E02$, are the saturation doses of each contribution. The $f(D)$ function may have the values; $f(D) > 1$ meaning supralinearity, $f(D) < 1$ meaning sublinearity and $f(D) = 1$, meaning linearity behavior. Another index $g(D)$ called superlinearity is commonly used to analyze linear and no linear behavior in the TL-dose response curves, and is given by:

$$g(D) = \frac{D M''(D)}{M'(D)} + 1 \quad (6)$$

The values of function $g(D)$ has different meanings: $g(D) > 1$ indicating superlinearity, $g(D) < 1$ sublinearity and $g(D) = 1$, linearity.

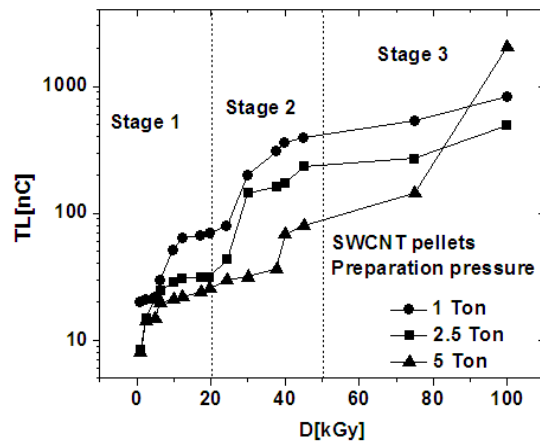


Fig. 8. Integrated thermoluminescence signal of SWCNT pellets as a function of dose.

As shown in Fig. 9, the behavior of $f(D)$ is the same for samples B and C. Pellet A exhibits a supralinear tendency in all ranges analyzed, while for pellet C, sublinearity is predominant in the range 1 up to 5 kGy. A supra-sublinear tendency is presented by pellet B. In Fig. 9, superlinearity index $g(D)$ also shows a similar behavior for pellets B and C, with an intense sublinearity occurring at the lowest dose. Meanwhile, pellet A shows sublinear-superlinear tendency.

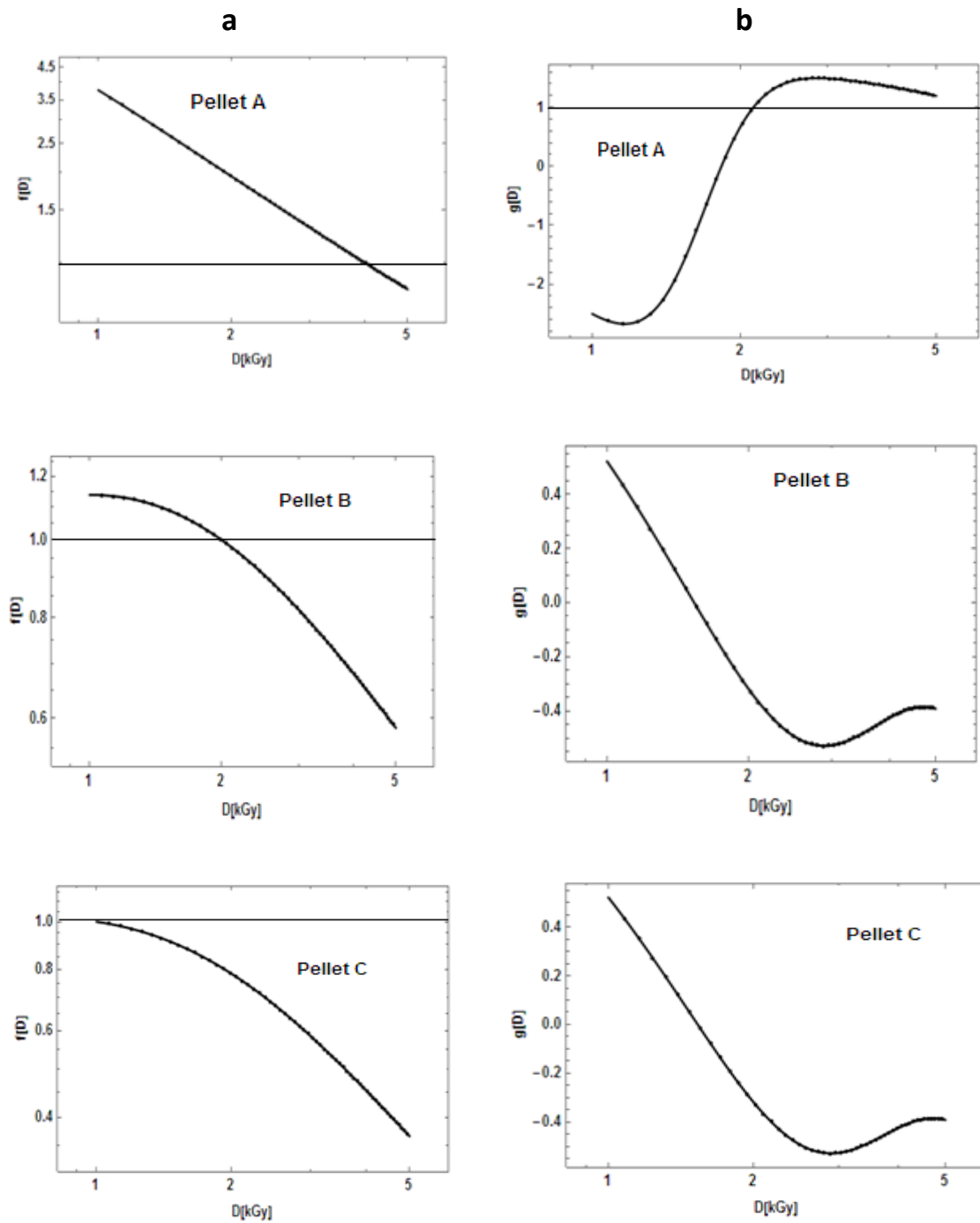


Fig. 9. Column a: Supralinearity $f(D)$ index, Column b: Superlinearity $g(D)$ index as a function of dose, for pellets A, B and C respectively.

IV. CONCLUSIONS

The experimental Raman spectra of samples indicate that SWCNT in the pellets end up in a state of stress and deformation as consequence of the application of pressure in pellet preparation. X-ray diffraction pattern of pellets after irradiation show an amorphous-like background as consequence of the creation of defects and partial amorphization of the SWCNT material. Pellets A, B and C analyzed in this work could be useful to measure high radiation fields given that they were tested at doses from 1.0 to 100 kGy. There is no difference in the number of trapping states generated between 2.5 and 5 Ton, in the glow curves, but there is a significantly difference in the TL-signals. A stable deconvoluted glow peak #2 appeared at 452, 465 and 477 K, for samples A, B and C, respectively. As pellet preparation pressure increases, activation energy decreases for all traps in the samples, indicating perhaps a decrease in the number of defects. The manufacturing pressure of pellets induce changes in the kinetic order. Finally pellet A is a promising TL-detector with usability at high gamma fields.

CRedit (Contributor Roles Taxonomy)

Author Contributions: Author Contributions: Conceptualization: AOM, JOL, BLA, RGA; Methodology: AOM, JOL, BLA, RGA; Software: AOM; Investigation: AOM, JOL, BLA, RGA; Writing-original draft preparation: AOM; Writing-review and editing: AOM; Supervision: AOM, JOL, BLA, RGA; Formal analysis: AOM, JOL, BLA, RGA; Project administration: AOM; Funding acquisition: AOM, JOL, BLA, RGA.

Acknowledgments: A. Ortiz-Morales acknowledge EDD-IPN 2025 for support and L.V.O-R and D.I.O-R, J. O-L acknowledges COFAA-IPN and EDI-IPN for academic scholarships and SIP-IPN for partial financial support through project number SIP-20210038. R.G-A acknowledge SIP-IPN for support through project number 20210036 and COFAA-IPN academic scholarship.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Data Availability Statement: Data available upon request.

Funding: No external funding was received for this work.

REFERENCES

- [1] A. Ortiz-Morales, M. García Hipólito, E. Cruz Zaragoza, R. Gómez Aguilar, "Characterization and thermoluminescence study of gamma irradiated Tb-doped ZnO and undoped ZnO synthesized by spray pyrolysis method", *Nova scientia*, vol. 13, no. 27, pp. 1-25, 2021. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2877>
- [2] A. Ortiz-Morales, J. Ortiz-Lopez, E. Cruz-Zaragoza, R. Gómez-Aguilar, "Thermoluminescence and photoluminescence analyses of MEH-PPV, MDMO-PPV and RU(bpy) 3 gamma-irradiated polymer thin films", *Applied Radiation and Isotopes*, no. 102, pp. 55–62, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.04.013>
- [3] A. Ortiz-Morales, R. Gómez-Aguilar, J. Ortiz-Lopez, E. Cruz-Zaragoza, "Characterizing the Dosimetric Properties of MEH-PPV Using Thermoluminescence (TL)", *MRS Proceedings*, vol. 1613, pp. 127-131, 2014. <https://doi.org/10.1557/opl.2014.169>
- [4] A. Ortiz-Morales, J. Ortiz-López, B. Leal-Acevedo, R. Gómez-Aguilar, "Thermoluminescence of single wall carbon nanotubes synthesized by hydrogen-arc-discharge method", *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 145, pp. 32-38, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.001>
- [5] L. Aparecida Forner, C. Viccari, P. Nicolucci, "Dosimetric properties of thermoluminescent pellets of CaSO₄ doped with rare earths at low doses", *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 171, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108704>

- [6] V. K. Mathur, A. C. Lewandowski, N. A. Guardala, J. L. Price. “High dose measurements using thermoluminescence of CaSO₄:Dy”, *Radiation Measurements* vol. 30 no. 6, pp. 735-738, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00244-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00244-9)
- [7] M. A. Tarawneha, S. A. Saraireha, R. Shan Chenb, S. Hj Ahmad, M. A. Al-Tarawni, L. Jiun Yu, “Gamma irradiation influence on mechanical, thermal and conductivity properties of hybrid carbon nanotubes/montmorillonite nanocomposites”, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 179, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109168>
- [8] J. Sobczak, A. Truszkiewicz, K. Cwynar, S. Ruczka, A. Kolanowska, R. G. Jedrysiak, S. Waskiewicz, M. Dzida, S. Boncel, G. Zyla “Soft, ternary, X- and gamma-ray shielding materials: paraffin-based iron-encapsulated carbon nanotube nanocomposites”, *Mater. Adv.*, no. 18, 2024. <https://doi.org/10.1039/d4ma00359d>
- [9] M. G. Albarrán Sánchez, E. Mendoza Villavicencio, E. Cruz Zaragoza, “Dosimetría Química de irradiadores gamma de ⁶⁰Co y ¹³⁷Cs de uso semi-industrial e investigación”, *Nova Scientia*, vol. 9 no. 19, pp. 113, 2017. <https://doi.org/10.21640/ns.v9i19.943>
- [10] J. Sippel-Oakley, H. T. Wang, B.S. Kang, Z. Wu, F. Ren, A.G. Rinzler, S.J. Pearton, “Carbon nanotube films for room temperature hydrogen sensing”, *Nanotechnology*, vol. 16 no. 10, pp. 2218–2221, 2005. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/10/040>
- [11] X. W. Tang, Y. Yang, W. Kim, Q. Wang, P. Qi, H. Dai, L. Xing, “Measurement of ionizing radiation using carbon nanotube field effect transistor”, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 50 no. 3, pp. N23–N31. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/3/N02>
- [12] V.N. Khabashesku, W. E. Billups, J. L. Margrave, “Fluorination of Single-Wall Carbon Nanotubes and Subsequent Derivatization Reactions”, *Accounts of Chemical Research*, vol. 35 no. 12, pp. 1087–1095, 2002. <https://doi.org/10.1021/ar020146y>
- [13] S. M. Bachilo, M.S. Strano, C. Kittrell, R. H. Hauge, R.E. Smalley, R.B. Weisman, “Structure-Assigned Optical Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Science*, vol. 298, pp. 2361–2366, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1078727>
- [14] M. X. Pulikkathara, M. L. Shofner, R. T. Wilkins, J. G. Vera, E. V. Barrera, F. J. Rodríguez-Macías, R.K. Vaidyanathan, C. E. Green, C. G. Condon, “Fluorinated Single Wall Nanotube/Polyethylene Composites for Multifunctional Radiation Protection”, *MRS Proceedings*, vol. 740, 2002. <https://doi.org/10.1557/PROC-740-111.6>
- [15] B. Khare, M. Meyyappan, M. Moore, P. Wilhite, H. Imanaka, B. Chen, “Proton Irradiation of Carbon Nanotubes”, *Nano Letters*, vol. 3 no. 5, pp. 643–646, 2003. <https://doi.org/10.1021/nl034058y>
- [16] T. S. Gspann, N. H. H. Ngern, A. Fowler, A. H. Windle, V.B.C. Tan, J. A. Elliott, “Triboluminescence flashes from high-speed ruptures in carbon nanotube Macro-Yarns”, *Materials Letters*, vol. 213, pp. 298–302, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.066>
- [17] S. M. Bachilo, M. S. Strano, C. Kittrell, R. H. Hauge, R. E. Smalley, R.B. Weisman “Structure-Assigned Optical Spectra of Single-Walled Carbon Nanotubes”, *Science*, vol. 298 no. 5602, pp. 2361–2366, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1078727>
- [18] V. Cruz-Alvarez, J. Ortiz-López, C. Mejía-García, J.S. Arellano-Peraza, V.M. Sánchez-Martínez, J. Chávez-Carvayar, “Anisotropies in Carbon Nanotube Synthesis by the Hydrogen Arc Plasma Jet Method”, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 13 no. 4, pp. 299–311, 2005. <https://doi.org/10.1080/15363830500237143>
- [19] T. M. Keller, S. B. Qadri, C. A. Little, “Carbon nanotube formation in situ during carbonization in shaped bulk solid cobalt nanoparticle compositions”, *J. Mater. Chem.*, vol. 14, pp. 3063-3070, 2004.
- [20] T. Shimada, T. Sugai, C. Fantini, M. Souza, L. G. Cançado, A. Jorio, M.A. Pimenta, R. Saito, A. Grüneis, G. Dresselhaus, M.S. Dresselhaus, Y. Ohno, T. Mizutani, H. Shinohara, “Origin of the 2450cm⁻¹ Raman bands in HOPG, single-wall and double-wall carbon nanotubes”, *Carbon*, vol. 43 no. 5, pp. 1049–1054, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.11.044>
- [21] V. Skákalová, “Effect of Gamma-Irradiation on Single-Wall Carbon Nanotube Paper”, *AIP Conference Proceedings*, vol. 685, pp. 143–147, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.1628005>
- [22] E. Cruz-Zaragoza, B. Ruiz-Gurrola, C. Wachter, T. Flores-Espinoza, M. Barboza-Flores, “Gamma radiation effects in coriander (*Coriandrum sativum* L) for consumption in Mexico”, *Rev. Mex. Fís.*, vol. 57, pp. 80-86, 2011.
- [23] G. Kitis, J. M. Gomez-Ros, J. W. N. Tuyn, “Thermoluminescence glow-curve deconvolution functions for first, second and general orders of kinetics”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 31, 1998. <http://doi.org/10.1088/0022-3727/31/19/037>

- [24] H. G. Balian, N. W. Eddy, “Figure-of-merit (FOM), an improved criterion over the normalized chi-squared test for assessing goodness-of-fit of gamma-ray spectral peaks” *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 145 no. 2, pp. 389–395, 1977. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(77\)90437-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(77)90437-2)
- [25] C. Sunta, W.E. Ayta, J.F. Chubaci, S. Watanabe, “General order and mixed order fits of thermoluminescence glow curves—a comparison”, *Radiation Measurements*, vol. 35 no. 1, pp. 47–57, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00257-8](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00257-8)
- [26] G. Kitis, V. Pagonis, S. E. Tzamarias, “The influence of competition effects on the initial rise method during thermal stimulation of luminescence: A simulation study”, *Radiation Measurements*, vol. 100, pp. 27–36, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.03.047>
- [27] H. A. Borbón-Nuñez, C. Furetta, “Activation Energy of Modified Peak Shape Equations”, *World Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 7 no. 4, pp. 274–283, 2017. <https://doi.org/10.4236/wjnst.2017.74021>