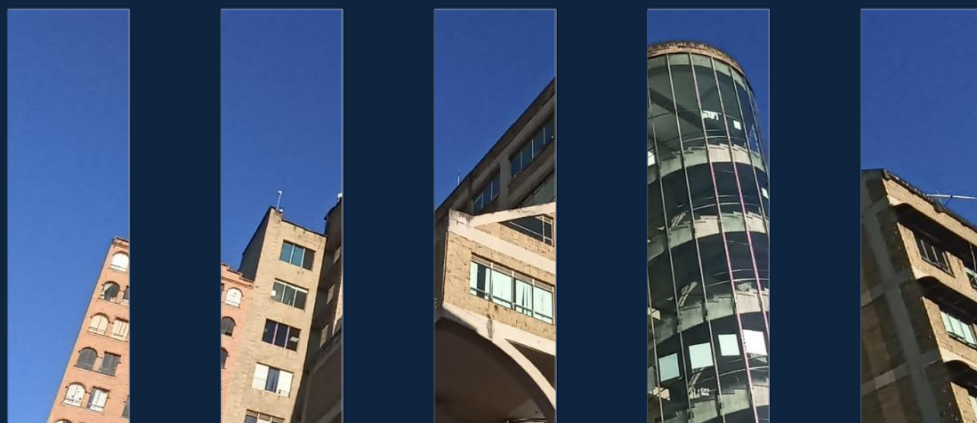


PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING, UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



ISSN: 3028-6727 (en línea)

Vol: 1

No.: 1

Year: 2022

Annual Volume



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Doctorado
en Ingeniería

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

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



PROCEEDINGS OF THE FACULTY OF ENGINEERING,
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
VOL 1 - 2022

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

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Rector: Dr. Giovanni Tarazona

Vicerrectora Académica: Dra. Mirna Jirón Popova

Vicerrector Administrativo: Elverth Santos Romero

Decana Facultad de Ingeniería: Dra. Luz Esperanza Bohorquez

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

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Elvis Eduardo Gaona-García Ph.D.

Comité Científico

Germán Hernández Ph.D., Universidad Nacional de Colombia

Carlos Franco Ph.D., Universidad del Rosario

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

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

Árbitros Volumen 1

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

Yesid Díaz M.Sc., Universidad de La Salle

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

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

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

Julio César Sandoval Eng., Universidad de La Salle

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

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

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

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

Gestión Editorial

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Corrección de Estilo

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Diagramación y montaje de cubierta

Johan Sebastián Tenjo-García Eng.

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Imagen de portada

Juan Carlos Figueroa-García Ph.D.

Periodicidad

Anual

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

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

email: doctoradoing@udistrital.edu.co

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

Prefacio

Durante los últimos 30 años se ha visto un desarrollo sin precedentes de la IA, los modelos y métodos de optimización y de simulación, tanto en el ámbito computacional como en la teoría subyacente. Las ingenierías son una rama aplicada de diversas ciencias que convergen en un punto clave para el éxito en su aplicación por lo que es necesario abrir espacios de publicación de los más recientes avances tanto aplicados como teóricos.

Así pues, este primer volumen de abstracts y resúmenes contiene los trabajos cortos presentados en los diversos eventos organizados por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en el año 2022 y que son una muestra de los avances en diversos campos que se han venido dando en el contexto latinoamericano, en especial la IA, optimización y simulación que son campos de aplicación fuertes de las ingenierías hoy en día. Dichos trabajos son el resultado del esfuerzo de los autores, sus colegas y sus instituciones para contribuir al desarrollo científico y tecnológico actual. Todos los trabajos aceptados fueron revisados por un equipo de revisores y han pasado por un trabajo editorial para finalmente componer este volumen que compila dichos resultados de investigación.

Agradecemos al comité científico y de revisores por su ayuda incondicional en el proceso de revisión y aceptación de los trabajos. También agradecemos a los autores sin quienes no hubiese sido posible construir este primer volumen para dar a conocer los desarrollos que se vienen dando en nuestra comunidad académica

Diciembre 2022

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

Índice general

Inteligencia Artificial

Graphical and textual representation of a wireless sensor system using a high-level specification	1
<i>Oscar Idrobo y Gerardo A. Muñoz-Quñones</i>	
Implementación de aprendizaje por refuerzo profundo para el control de sistemas dinámicos no lineales	6
<i>C. H. Cristancho Toloza, J. A. Tumialán Borja, C. H. Rodríguez Garavito y D. J. Lancheros Cuestas</i>	

Optimización

Modelo para la distribución de combustible aplicando técnicas de enrutamiento de vehículos	10
<i>Julián Enrique Ramírez Mora, Joan Esteban Moreno Hernández, Isaías Julián Sarmiento, Santiago Omar y Caballero Morales</i>	
Automatización y simulación de un proceso crítico en una empresa TI bajo el enfoque business process management BPM	15
<i>Claudia Yadira Rodríguez-Ríos y Luisa María Piraban-Lozano</i>	
WMS-Based Web Environment for Ground Truth Semantic Segmentation Creation of Earth Surface Digital Images	20
<i>J. A. Valero, J. L. Herrera y K. Quijano</i>	
Multiobjective-Multiperiod Location and Routing Mathematical Model Applied to Hazardous Waste Management	23
<i>P.A. Cabrales, J.C. Camacho y J.E. Arias</i>	
Solución del Problema de Localización, Ruteo e Inventarios en Ambientes Multiobjetivo.	26
<i>Carlos Arturo Salazar-Vargas, Eliana Mirledy Toro-Ocampo y Ramón Alfonso Gallego-Rendón</i>	
Estudio comparativo del comportamiento y atención de los incidentes de la línea de emergencia en salud pre COVID-19 y COVID-19 en la ciudad de Bogotá	31
<i>Jhohan Andrés Sánchez-Moreno y Juan Carlos Figueroa-García</i>	

Aplicaciones

Análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 de la región de Aysén en Chile: Proceso de clasificación y sistema en prospectiva	37
<i>J. Ceballos Varela y L.E. Cardona Meza</i>	
Real-time Energy Mangement System Supported on Cloud Services for Cluster of Microgrids.	40
<i>David Rosero-Bernal, Enrique Sanabria-Torres, Fabio Andrade-Rengifo, Nelson Díaz-Aldanay César Trujillo-Rodríguez</i>	
Teleoperación de robots mediante ROS e Internet	46
<i>Manuel E. Lugo M., Felipe González R. y Pedro-F. Cárdenas</i>	
Study of the Correlation between Ground Flash Density, Population Density and Lightning Mortality in Colombia – Progress Report	50
<i>D. Villamil-Rojas, H. E. Rojas y F. Santamaria</i>	

Simulación

Meta-modelo de Ciberseguridad con Blockchain para IoT	56
<i>Julio Cesar Rodríguez Molano</i>	
Design of a Density Sensor for Biological Wastewater Treatment and Testing in a Pilot Plant	62
<i>J.A. Muñoz-Hernández, H. Muñoz-Hernández, K.A. Oviedo-Prioló y R.C. Osorio-Mass</i>	
Balance of a bipedal robot from the comparative simulation of the PID and LQR controllers.....	67
<i>J. D. Téllez, R.A. Acosta Rodríguez, K.A. Oviedo-Prioló y R.C. Osorio-Mass</i>	
Método que permita identificar la cantidad necesaria de personal requerido en una oficina de atención al cliente	72
<i>Wilson Alfonso Cepeda-Cepeda y Juan Carlos Figueroa-García</i>	
A survey of Homomorphic cryptography, ZPK, and zk-SNARK protocols for identify and privacy protection in Ethereum blockchain	75
<i>Jawy Andres Romero Pinto y Elvis Eduardo Gaona Garcia</i>	
Non-Linear Programming and Queueing Network Approach for the Vaccination Process in Colombia	78
<i>Carlos Franco, Herazo-Padilla y J. Castañeda</i>	
Development of a low-cost monitoring system based LoRaWAN IoT for small wind turbine energy production	80
<i>Andrés Camilo López García, Héctor Guillermo Parra Peñuela y Elvis Eduardo Gaona Garcia</i>	

Graphical and textual representation of a wireless sensor system using a high-level specification

Oscar Idrobo,¹ Gerardo A. Munoz-Quinones²
ojdrobol@correo.udistrital.edu.co, gmunoz@udistrital.edu.co

Abstract—This document presents preliminary results to a methodology to implement a model of a wireless sensor network using a high-level graphical description called HiLeS. The methodology is explained with an example that represents the humidity control for plants, over a wireless sensor network. Also, a textual representation of HiLeS is proposed and a tool to display it.

Index Terms—HiLeS, SysML, WSN, Simulation, Distributed system.

I. INTRODUCTION

DEVELOPING tools that describe and build systems that make it possible to acquire information will facilitate the interoperability of technologies. At the engineering level, the universal modeling language UML [2] or its extension, the system specification language SysML [3], is widely used to model systems; These allow the description of a system at the level of requirements, structure, and behavior, defining their relationships with a high degree of accuracy, in different domains.

The HiLeS[1] formalism allows the definition of context-adjustable rules and, due to its nature, it is possible to build a graphical representation to later carry out a structural and behavioral validation of the system using the Petri net standard.

A wireless sensor network or WSN, according to the International Telecommunications Union (ITU-T) [4], can be defined as "a network composed of wirelessly interconnected sensor nodes that exchange data", the architecture for this networks involves variables such as transmission rate, number of nodes, type of information, latency, bandwidth, energy consumption and distance between nodes, which determine the protocol to choose and consequently the devices to use.

A wireless network can be modeled using UML as mentioned [5] Some diagrams used are:

- Requirements: defining the restrictions and services of the system
- Activity Diagram: Allows you to describe the process that an element of the network or the network itself may have.

¹ Este documento fue enviado para participar en el evento "Taller de aplicaciones en Ingeniería (WEA 2022) - Inteligencia Artificial, Optimización, y simulación" fue enviado el 23 de Junio del 2022 en la categoría de "Call Abstract" Primer autor, es estudiante de la maestría en ciencias de la información y las comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (UD -FJC), email: ojdrobol@correo.udistrital.edu.co

² Segundo autor, es Dr. en Matemáticas e Investigador principal en el Laboratorio de automática e inteligencia computacional (LAMIC) en la UD -FJC, email: gmunoz@udistrital.edu.co

HiLeS complements traditional modeling by providing the possibility of validating the behavior of continuous and discrete systems, identifying states and relating them sequentially.

II. BACKGROUND

A. HiLeS

HiLeS allows you to graphically integrate two types of descriptions. The first description uses a Petri net to model the events.

In a Petri net there are some **Tokens** that can be moved from one Place to another, the Places are represented by circles and the Tokens by points. Tokens can change of places through **Event Channels**, which must go through one **Transition**.

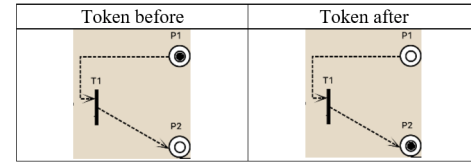


Fig. 1. Token before and after the transition fires.

The Transitions are responsible for indicating when the Tokens change Places. When several Places are connected to the same Transition it is necessary that they all have a Token for the TRANSITION to be triggered, so the Token is removed from each previous Place, and it is placed in each following Place. In addition to the Petri net, in HiLeS there

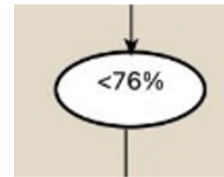


Fig. 2. Functional block that receives a number and returns a boolean

are **Functions**, which are represented by ellipses larger than places. The inputs and outputs of the Functions are represented by the **Data Channels**. Each of these Channels has a data type associated with it.

A boolean Data Channel can come out of the Places, indicating 'True' when it has a Token. Transitions can receive a boolean Data Channel, which inhibits the Transition with 'False'.

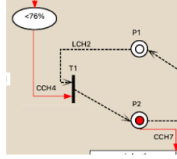


Fig. 3. FTransition receives a Boolean Data Channel and Boolean Data Channel come out of the Places

Event and Data Channels can be combined into a single **Package Channel** using a **Sampler**. Just when the transition associated with the Event Channel is triggered, the value in the Data Channel is sampled and a package is sent through the Package Channel.

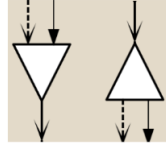


Fig. 4. Sampler and Hold

To separate the Event Channel and the Data Channels of a Packet Channel, a **Hold** is used, which sends the Token through the Event Channel and maintains the received data through the Data Channel when a package is received.

The last block is called **Structural** and allows to contain all the HiLeS components. In addition, they can enter and exit any of the channels.

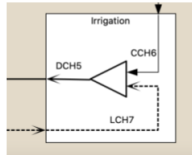


Fig. 5. Structural Block

B. Node or Sensor

Device with the ability to capture information from its environment and transmit it. To implement this type of systems, characteristics such as the following must be taken into account:

- Number of sensors.
- Type of communication (synchronous or asynchronous).
- Communication and routing.
- Energy consumption in the devices.
- Remote Configuration.

In order to have an overview of commercial technologies, Table I shows an evaluative summary taking into account:

- Communication standard.
- Consumption.
- Computing capacity.
- Development environment.
- Cost

Device	Communication Protocol	Energy Consumption	Computer Capacity	Development environment
ESP8266	Wifi ⚠️	80mA - 5V Ⓜ️	32 bits - 160MHz - RICS Ⓜ️	Diversificado Ⓜ️
ESP32	Wifi, Bluetooth (BLE) ✅	50mA - 5V ✅	32 bits - 240MHz - Xtensa Ⓜ️	Espressif To Development Framework ✅
Xbee PRO S2C	Zigbee Ⓜ️	47mA - 3.3V ✅	32bits - 50MHz ❌	Dos propios de la marca ⚠️
Raspberry Pi Zero W	Wifi, Bluetooth (BLE) ✅	230mA - 5V ❌	64 bits - 1GHz - 4 Nucleos ARM Cortex A53 ✅	Diversificado - Integracion con camara ✅
Raspberry Pi pico	Ninguno ❌	600mA - 5.2V ❌	32 bits - 133MHz - Dual Core ARM Cortex M0 ✅	Diversificado Ⓜ️

Fig. 6. Summary of commercial devices to implement a WSN(January 2022)

III. PRELIMINARY RESULTS

A. Modeling Example

In order to describe the model of a WSN, an example is presented that allows showing the intrinsic characteristics of the modeling.

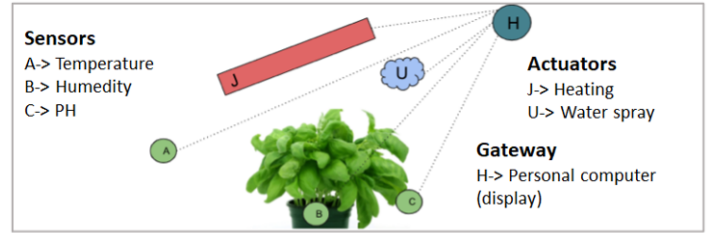


Fig. 7. Model Example WSN

Fig. 7 defines an implementation that aims to improve the life cycle of a plant, controlling its environmental variables and ensuring heating and PH rates through actuators. In addition to implementing a visualization system through a personal computer. Using traditional modeling the system can be described by the figures form7 to 10.

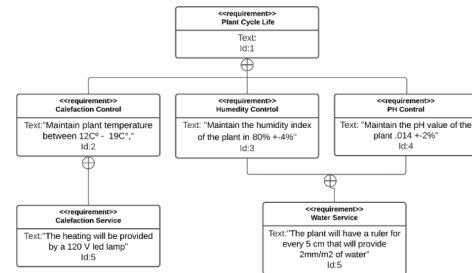


Fig. 8. System Requirements Diagram.

According to the need and level of specificity, UML and SysML allow to develop in greater detail the behavior and structure of the system, keeping in mind that this is not the purpose of this document, we will continue considering only these diagrams.

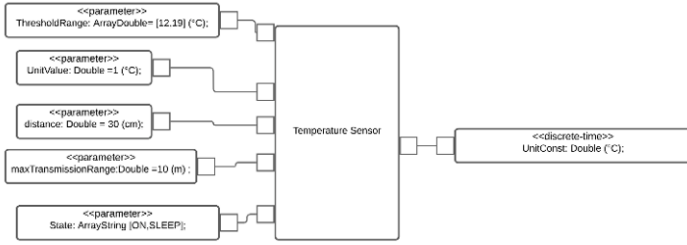


Fig. 9. Parametric diagram of the Temperature sensor

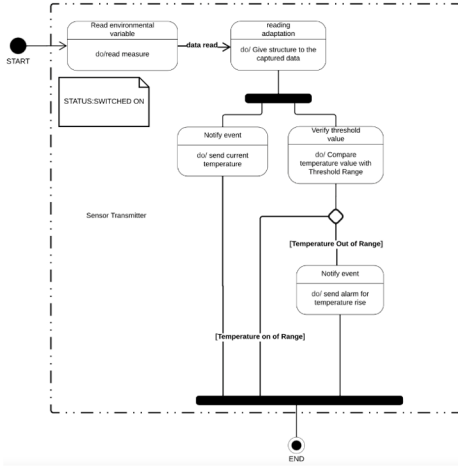


Fig. 10. Transmitter node state machine diagram.

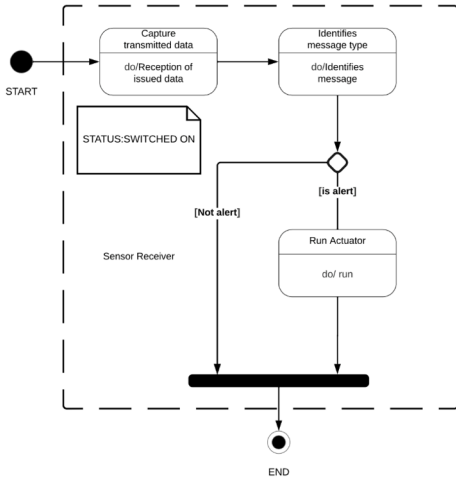


Fig. 11. Receiver node state machine diagram.

B. HiLeS Metamodel

From the metamodel, shown in figure 12, stands out:

- Makes use of factories, to abstract properties in common.
- The “ElementHiLeS” object will oversee grouping the HiLeS elements that will be used (functional block, structural block, ports, services, sampler, retainer, places and transitions).
- A connector will link at least two HiLeS elements.
- When implementing places and transitions, these elements must make up a Petri net.

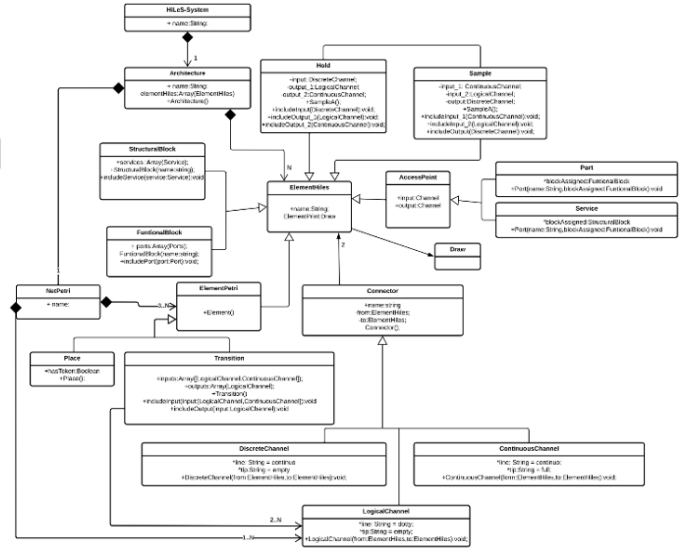


Fig. 12. HiLeS MetaModel.

- Ensure some rules of the HiLeS specification, such as:
 - The transitions accept connectors of the discrete or continuous type.
 - The services are used by the structural blocks and the ports by the functional blocks.
 - An architecture is composed of several HiLeS Elements.
- Allows the implementation of an abstraction layer that will allow a visual representation to be made.

C. Graphical Implementation of the example

The HiLeS implementation for the Humidity control of the system described in Figure 7 is developed.

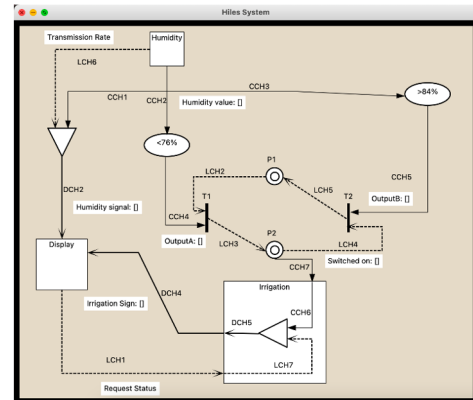


Fig. 13. HiLeS model to control Humidity and visualization in WSN system to improve the life cycle of a plant.

Let's start by talking about the ‘Humidity’ Structural Block at the top of Figure. 13 Two channels come out from this block. A Data Channel comes out from below with the humidity value. An Event Channel comes out from the left and fires a token when the value is updated

Two functional blocks control the maximum (84%) and minimum (76%) humidity threshold, and each Boolean output controls the trigger of each transition. Depending on the humidity value, the token moves from one place to another.

The 'Irrigation' Structural Block receives a Boolean Data Channel from a Place, it is used to turn the irrigation on and off. The value of this channel is also sampled when a Token comes from the 'Display' Structural Block as soon as the status is required. The Sample groups the Data Channel with the Event Channel into a Packet Channel

The 'Display' Structural Block also receives a Package Channel from the Sample that groups a Data Channel with the humidity and an Event Channel.

D. Example simulation

To understand the operation of the humidity control system proposed in the model presented in Figure 13, a sequence of humidity values over time are presented in red color from figure 14 to figure 20

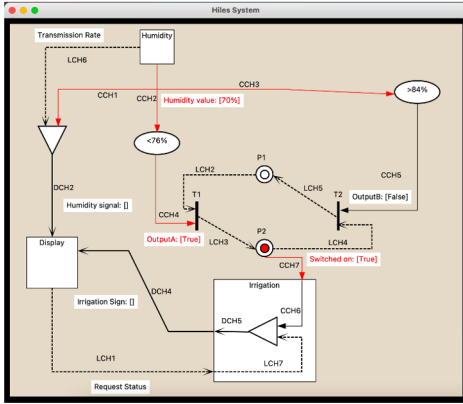


Fig. 14. Humidity value is 70%, that is less than 76%. So, the irrigation is on.

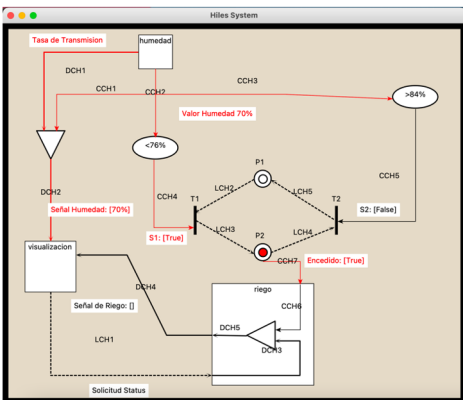


Fig. 15. Due to the humidity update, a token of the Structural Block 'Humidity' comes out, through its Event Channel.

In the previous description, irrigation will turn off based on Humidity conditions. HiLeS also allows the humidity device to have synchronous communication with the display device. Also, that the display device requests the irrigation status asynchronously.

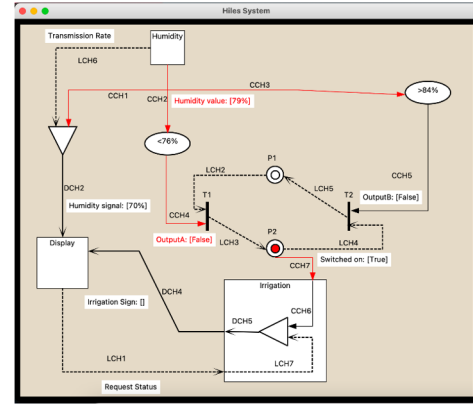


Fig. 16. Humidity value increases to 79%, irrigation continues..

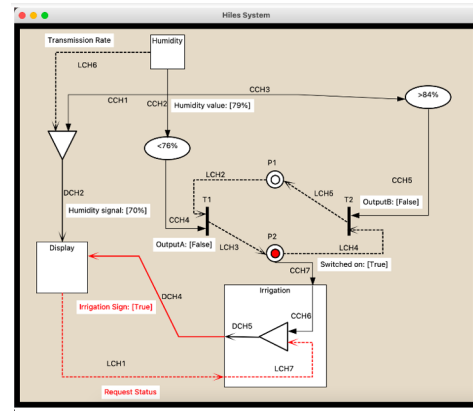


Fig. 17. There is an irrigation status request due to the token that comes out of the Display Structural Block. Then the irrigation is displayed as True.

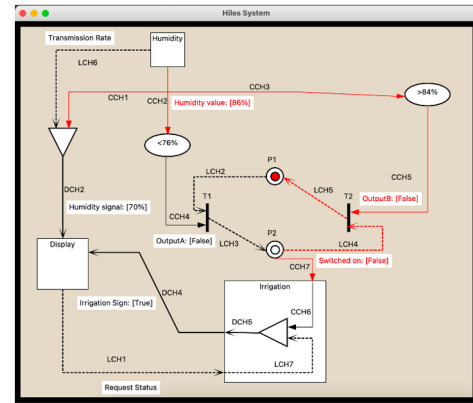


Fig. 18. The humidity value increases to 86%. Then the token is moved, and irrigation is turned off.

E. Textual Implementation of the example

There are two textual representations for HiLeS components, the first one is in JSON and the second one is based on its Python constructors. As an example, the code that defines the Structural Block for the 'Humidity' and a connected channel, is described like in the figure 21

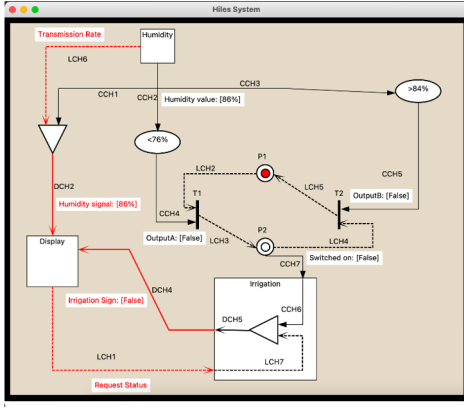


Fig. 19. There is another irrigation status from Display Structural Block. Then the irrigation is displayed as False.

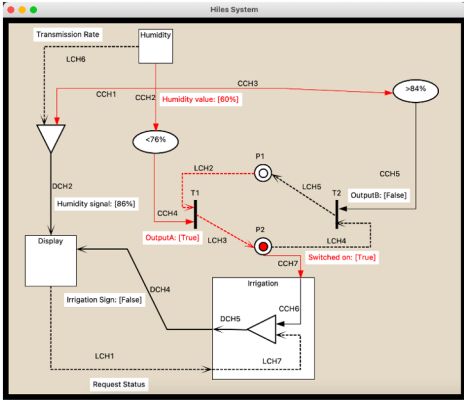


Fig. 20. The humidity value decreases to 60%. Then the token is moved again, and irrigation is turned on.

- JSON:


```
{ "structural_block": { "name": "Humidity" } }
```

```
{ "logica_channel":
  { "name": "LCH6",
    "from_": { "sample": { "name": "Humidity signal: {}" } },
    "to_": { "structural_block": { "name": "Humidity" } } }
```
- Based on its Python constructors:


```
humidity = architecture.structuralBlock(name='Humidity',
                                         centerX=180,
                                         centerY=60,
                                         length=50 )

architecture.logicalChannel(name='LCH6',
                           from_=transmisorHumedad,
                           to_=humidity,
                           points=[240, 51, 73, 51,
                                   73, 191],
                           pointNameX=0,
                           pointNameY=-25)
```

Fig. 21. Example of JSON and Python code

IV. CONCLUSIONS

HiLeS is a standard that complements the modeling of a wireless sensor network, since it allows simulating some characteristics of the system. The proposed HiLeS meta-model

implementation is ideal for making a textual and graphical description using the Python language. Likewise, it is possible to obtain a simulation of the behavior of the system having as input the JSON of connections of the proposed metamodel, including aspects such as memory and non-blocking information exchange.

REFERENCES

- [1] F. Jimenez, M. Courvoisier, A. Garcia, G. Munoz, N. Harchani, M. Al-Mohamed, D. Esteve "Tools and models for systems design and synthesis of MEMS based on asynchronous circuits" in Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology 2000, Goa, India, 2002, <https://doi.org/10.1109/icit.2000.854098>
- [2] Unified Modeling Language, 2.5.1, OMG - Object Management Group, Milford, MA 01757 USA, December 2017. [Online]. Available: <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/PDF>
- [3] Systems Modeling Language, 1.6, OMG - Object Management Group, Milford, MA 01757 USA, November 2019. [Online]. Available: <https://www.omg.org/spec/SysML/1.6/PDF>
- [4] Y Series: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks, 1.0, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Page:10, July 2012. [Online]. Available: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2069-201207-1!!PDF-S&type=items
- [5] Jacob J., Liscano R., Bradbury J. and Fisher J., "UML Modelling of Design Patterns for Wireless Sensor Networks", in Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS-2013), pages 89-93, Setúbal, Portugal 2013, <https://doi.org/10.5220/0004316200890093>
- [6] Mozilla (2022, June 22). mdn web docs [Online]. Available: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Learn/JavaScript/Objects/JSON>
- [7] MicroPython (2022, June 22). George Robotics Limited [Online]. Available: <https://micropython.org/>



Oscar J. Idrobo was born in Bogotá, Colombia on August 19, 1993, Electronic Engineer graduated in 2017 and master's student in Information Sciences, member of the LAMIC research group of the Francisco José de Caldas District University of Bogotá, Colombia. He has knowledge in Software Engineering and has more than 3 years of experience, he is interested in the concept of IoT and has developed a hub with Interoperability Capabilities for Wireless Sensor Networks in the year – 2015



Gerardo A. Muñoz was born in Bogotá Colombia on 10/27/1970. Upon finishing high school, he participated in the National Physics Olympiad, placed third in the country, and then earned an honorable mention at the International Physics Olympiad. He is an Electronic Engineer with a master's degree in the same area; At the beginning of his career, he worked on the design of some types of equipment with microcontrollers. He did his Ph.D. in Mathematics, where he categorically related Scott's Information Systems to Formal Concepts. He currently works

as a professor of Electronic Engineering at the Francisco José de Caldas District University and is a member of the LAMIC group. With more than 20 years of teaching experience, has developed and directed projects in the areas of Machine Learning, Image Processing, and Systems Modeling, among others; Among the courses recently completed, it is worth highlighting the specialization in Natural Language of DeepLearning.AI.

Implementación de aprendizaje por refuerzo profundo para el control de sistemas dinámicos no lineales

C. H. Cristancho Toloza, J. A. Tumialán Borja, C. H. Rodríguez Garavito, D. J. Lancheros Cuestas.

Facultad de Ingeniería en Automatización

Universidad de la Salle

(ccristancho43,jtumialan,cerodriguez,dilancheros@unisalle.edu.co)

Resumen—El aprendizaje por refuerzo profundo, o Deep Reinforcement Learning, es uno de los campos de la inteligencia artificial que tiene un potencial uso en los próximos años. Este paradigma permite que los algoritmos aprendan de su entorno para lograr objetivos, superando así las limitaciones que se encuentran en los algoritmos tradicionales de aprendizaje automático enfocados en que las máquinas aprendan por sí solas. Sin embargo, no existe un camino sistemático universal a la hora de establecer una metodología adecuada para abordar los problemas y sus aplicaciones. Este artículo presenta el uso de los algoritmos Deep Q-Learning con un buffer de repetición de experiencias implementado en Python utilizando las librerías de Tensorflow. Como primer paso se establece el modelo de un sistema dinámico no lineal (péndulo invertido) como el entorno de interacción para el agente de aprendizaje por refuerzo. El agente de aprendizaje por refuerzo elige una acción de acuerdo con el estado del sistema, la acción incremental puede acercarse gradualmente a la estrategia óptima y luego el agente actualiza la red mediante diferentes recompensas obtenidas en el proceso de interacción. Para lograr la convergencia del movimiento de un péndulo invertido a su estado de equilibrio en una cantidad razonable de iteraciones. Los resultados indican que los algoritmos realizan entre 100 y 300 iteraciones en promedio para lograr la convergencia. Esta aplicación del aprendizaje automático al control de sistemas complejos y caóticos refuerzan el enfoque de los algoritmos de aprendizaje en muchos campos donde se requiere lograr la autonomía del agente o sistema, frente a los controladores clásicos dada la capacidad para generalizar experiencia y extraer patrones de información de las redes neuronales.

Indice de Términos—Deep Q Learning, péndulo invertido, control no lineal, redes neuronales, inteligencia artificial.

I. INTRODUCCIÓN

DESDE hace varias décadas la respuesta dinámica y el control de sistemas basados en n-péndulos invertidos ha tenido una gran relevancia en el campo de la teoría de control [4]. Los controladores tradicionales u otros reguladores se utilizan ampliamente debido a su simplicidad y eficiencia. Sin embargo, estos requieren de un modelo matemático preciso, además presentan múltiples problemas cuando los modelos presentan una alta no linealidad y son inestables en el tiempo [5]. Por lo que a raíz de estos problemas surge la motivación de implementar otras técnicas como el aprendizaje reforzado y aplicarlas al ámbito del control, debido al rendimiento que estos algoritmos han demostrado en entornos complejos

tales como juegos de estrategia y videojuegos mediante un aprendizaje completamente no supervisado [1] y centrándose en mejorar el rendimiento en tiempo real, es decir, entre más el algoritmo sea expuesto a el entorno este mejora su rendimiento.

La teoría del aprendizaje por refuerzo ha ganado gran fuerza en los últimos años debido a múltiples avances que han sido presentados, en especial por parte de Deep Mind y su sistema AlphaGo, el cual domino el juego Go, sin necesidad de apoyarse en el conocimiento humano [1]. Estos métodos de aprendizaje tienen diferentes enfoques de aprendizaje, pero básicamente el concepto fundamental del aprendizaje por refuerzo es: El agente reacciona a un entorno que produce un estado y una recompensa basada en la acción seleccionada en el entorno, de este modo el agente busca maximizar la recompensa en su entorno a lo largo del tiempo [2].

Los métodos de aprendizaje por refuerzo son una alternativa prometedora a los métodos clásicos de control, debido a que permite al agente (sistema dinámico) encontrar la mejor acción a partir de sus propias experiencias mediante ensayo y error [3].

II. APRENDIZAJE POR REFUERZO

El aprendizaje por refuerzo es una rama dentro del aprendizaje automático dedicada al desarrollo de algoritmo que sean capaces de tomar acciones en un entorno para maximizar la noción de recompensa acumulativa [2]. Un algoritmo simple de aprendizaje por refuerzo puede ser modelado como un proceso de decisión de Markov (MDP) [8] en el cual, se tienen:

- Un conjunto de estados del ambiente y del agente, S .
- Un conjunto de acciones del agente, A .
- $P_a(s, s') = \Pr(s_{t+1} = s' \mid s_t = s, a_t = a)$ es la probabilidad de transición en el tiempo t desde el estado s al estado s' dada una acción a .
- $R_a(s, s')$ es la recompensa obtenida luego de la transición del estado s al estado s' dada una acción a .

El objetivo de un algoritmo de aprendizaje reforzado es que el agente aprenda una política π donde dada una función de transición $A \times S \rightarrow S$ maximice la recompensa acumulativa esperada.

II-A. Q-Learning

El Q-learning es un método de aprendizaje por refuerzo que se fundamenta en aprender una serie de normas que le diga a un agente qué acción tomar bajo qué circunstancias, este algoritmo aprende el valor de acción ("valor Q") y lo actualiza de acuerdo con la ecuación de Bellman [9]. El algoritmo necesita un modelo del entorno. Este algoritmo involucra a un agente, un conjunto de estados S y un conjunto A de acciones por estado, en base a esto se inicializa una tabla para almacenar los valores Q por cada estado-acción, para que el agente actualice de manera episódica los valores de dicha tabla en base a la experiencia que va adquiriendo (ecuación 1).

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow (1-\alpha) \cdot Q(s_t, a_t) + \alpha \cdot \left(r_t + \gamma \cdot \max_a Q(s_{t+1}, a) \right) \quad (1)$$

En donde en cada tiempo t el agente selecciona una acción a_t , observa una recompensa r_t e introduce un estado nuevo s_{t+1} y actualiza Q .

II-B. Deep Q-Learning

El algoritmo Deep Q-Learning presenta una mejora al Q-Learning, mejorando el entrenamiento de Q-learning y haciéndolo más estable y eficiente en datos, cuando el valor Q se aproxima con una función no lineal [7], puede ser remplazada por una red: neuronal densa multicapa, convolucional o recurrente, según el problema.

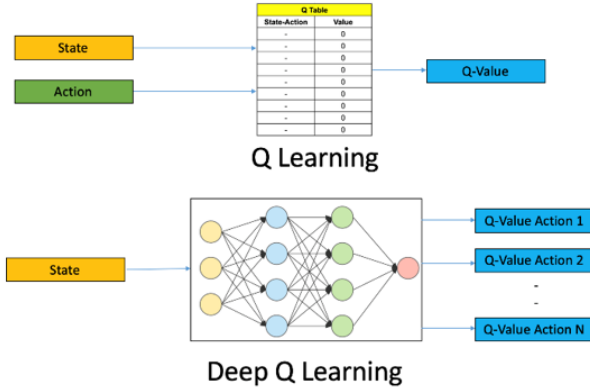


Figura 1. Comparación entre Q-Learnig y Deep Q-Learning [2]

La ecuación 2 se utiliza para calcular la pérdida el entrenamiento de las redes neuronales.

$$L(\theta) = \mathbb{E} \left[\left(r + \gamma \cdot \max_a Q(s', a'; \theta') - Q(s, a; \theta) \right)^2 \right] \quad (2)$$

II-C. Deep Q-Learning con buffer de memoria (experience replay)

Más allá de ser una evolución del Deep Q-Learning, el uso del buffer de memoria (experience replay) constituye una mejora desde la forma conceptual de aplicar el principio de funcionamiento de los métodos batch. Que consiste en almacenar las transiciones adquiridas y presentarlas múltiples veces al algoritmo estándar, como si el aprendizaje fuese

online y el agente estuviese realizando las mismas transiciones una y otra vez [7]. Las ventajas de aplicar esta estrategia es mejorar la eficiencia de los datos, eliminando las correlaciones en las secuencias de observación y suavizando los cambios en la distribución de los datos.

Algorithm 1 Deep Q-learning with Experience Replay

```

Initialize replay memory  $\mathcal{D}$  to capacity  $N$ 
Initialize action-value function  $Q$  with random weights
for episode = 1,  $M$  do
  Initialise state  $s_t$ 
  for  $t = 1, T$  do
    With probability  $\epsilon$  select a random action  $a_t$ 
    otherwise select  $a_t = \max_a Q^*(s_t, a; \theta)$ 
    Execute action  $a_t$  and observe reward  $r_t$  and state  $s_{t+1}$ 
    Store transition  $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$  in  $\mathcal{D}$ 
    Set  $s_{t+1} = s_t$ 
    Sample random minibatch of transitions  $(s_i, a_i, r_i, s_{i+1})$  from  $\mathcal{D}$ 
    Set  $y_j = \begin{cases} r_j & \text{for terminal } s_{t+1} \\ r_j + \gamma \max_{a'} Q(s_{t+1}, a'; \theta) & \text{for non-terminal } s_{t+1} \end{cases}$ 
    Perform a gradient descent step on  $(y_j - Q(s_t, a_j; \theta))^2$ 
  end for
end for

```

Figura 2. Pseudo código de Deep Q-Learning con Experience replay [7].

III. METODOLOGÍA

La metodología inicia con el análisis e implementación de un algoritmo de aprendizaje reforzado profundo basado en Deep QLearning, aplicado en un modelo de péndulo invertido, como una alternativa al remplazo de los controladores tradicionales, al tiempo que se utilizó un computador de alto rendimiento basado en GPU para acelerar el proceso de entrenamiento.

III-A. Entorno empleado

Es un modelo matemático de un péndulo invertido simple descrito por Barto, Sutton, y Anderson [6], implementado en Python (Open AI Gym), este entorno provee datos del estado actual del modelo: posición del péndulo, velocidad angular y presenta una interfaz sencilla para la interacción del modelo con el entorno.

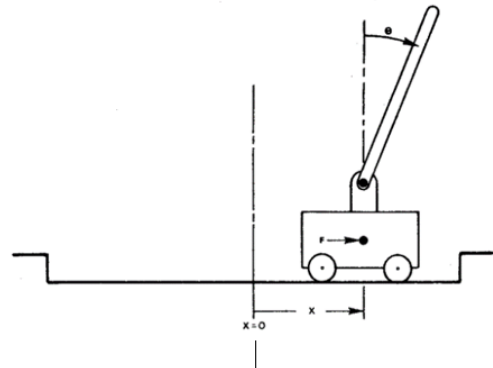


Figura 3. Representación gráfica del modelo del péndulo invertido [6].

Las variables que se tienen en cuenta en el modelo dinámico se presentan en la Tabla I

Tabla I
VARIABLES DEL PENDULO INVERTIDO

M	Masa del carro
M	Masa del poste
I	Inercia del poste
U	Fuerza aplicada al carro
G	Constante de gravedad
X	Posición del carro
Θ	Ángulo del poste
L	Longitud del poste

Las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica del sistema se presentan en las ecuaciones (3) y (4).

$$\ddot{\Theta}_t = \frac{g \sin \Theta_t + \cos \Theta_t \left[\frac{-F_t - mL\dot{\Theta}_t^2 \sin \Theta_t + u_c \operatorname{sgn} \dot{X}_t}{M+m} \right] - \frac{u_p \dot{\Theta}_t}{mL}}{L \left[\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \Theta_t}{M+m} \right]} \quad (3)$$

$$\ddot{X}_t = \frac{F_t + mL \left[\dot{\Theta}_t \sin \Theta_t - \ddot{\Theta}_t \cos \Theta_t \right] - u_c \operatorname{sgn} \dot{X}_t}{M+m} \quad (4)$$

Los rangos de los valores de la recompensa que entrega el entorno por cada acción se presentan en la Tabla II.

Tabla II
TABLA DE RECOMPENSAS DEL ENTORNO

Recompensa	Estado
+1	Por mantener el baston ergido y dentro de los parametros estipulados.
-100	Por permitir la caída del baston o que el carro se salga de los limites.

III-B. Arquitectura general

La arquitectura está basada en un modelo Deep Q-Learning, una red neuronal densa en conjunto con un buffer de memoria (Experience replay) [7], esta red neuronal se entrenó en un entorno en el cual se recibe información referente a la posición del péndulo, la velocidad angular y la posición y velocidad del carro. El modelo le indica al carro si moverse a la izquierda o a la derecha en cada periodo de tiempo.

En la Tabla III se presenta los valores de entradas de los modelos.

Tabla III
ENTRADAS DEL MODELO

1	Posición del carro	m
2	Velocidad del carro	m/s
3	Angulo del baston	rad
4	Velocidad angular del baston	rad/s

En la Tabla IV, se presenta los valores de salida del modelo.

Tabla IV
SALIDAS DEL MODELO

1	Mover el carro a la izquierda
2	Mover el carro a la derecha

En la Tabla V se muestran las arquitecturas de los modelos empleados para cuatro variables de entradas y dos variables de salida, cabe resaltar que en todas las arquitecturas probadas cada capa oculta cuenta con 24 neuronas.

Tabla V
ARQUITECTURAS EMPLEADAS

	Capas ocultas	Cantidad de parametros
Modelo 1	1	170
Modelo 2	2	770
Modelo 3	3	1370
Modelo 4	4	1970

En la figura 4 se presenta de modo ejemplo una representación gráfica del modelo 2, con cuatro entradas y dos salidas.

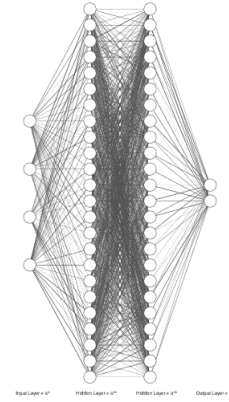


Figura 4. Diagrama de la red neuronal implementada en el modelo 2.

IV. RESULTADOS PARCIALES

Se obtuvo 4 modelos los cuales fueron sometidos a un entrenamiento de 300 episodios en los cuales los modelos interactuaron con el entorno, la evolución del rendimiento de los modelos puede ser observada en la figura 5, en el cual se ve cómo los modelos mejoran continuamente el valor de recompensa a medida que son expuestos al entorno.

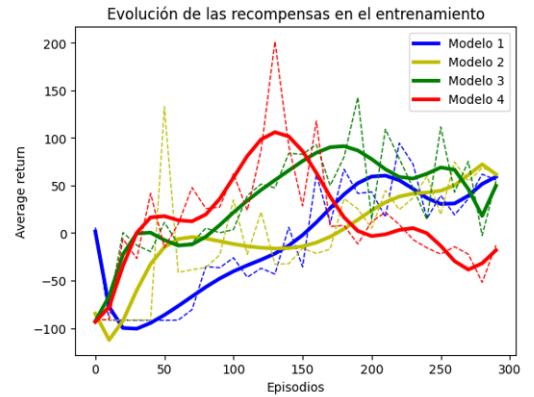


Figura 5. Evolución de las recompensas de los modelos provenientes del entorno, dichas recompensas reflejan la capacidad en que el modelo es capaz de mantener el péndulo invertido estable.

El tiempo promedio empleado para el entrenamiento de cada arquitectura fue de aproximadamente de 2 horas. En la

figura 6, se presenta los resultados a través de un diagrama, el promedio de recompensas obtenidas por cada modelo al ser evaluadas en el entorno durante 100 ejecuciones. Se observa que los modelos que obtuvieron mayores recompensas son los que presentan mejores resultados.

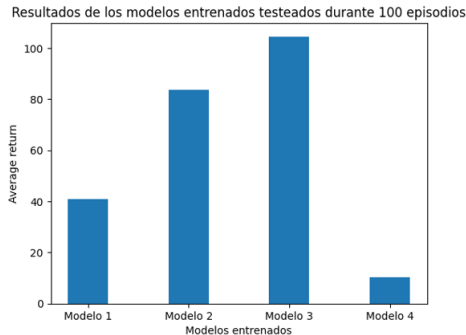


Figura 6. Resultados obtenidos al evaluar los modelos luego de ser entrenados.

Después del entrenamiento cada modelo fue probado en el entorno de simulación para evaluar su funcionalidad y eficiencia al mantener estable el péndulo invertido en un punto de referencia. En la figura 7, se presenta la respuesta en el tiempo de cada modelo con el objetivo de mantener la barra del péndulo estable. Y se observa que el modelo 4 no consigue controlar el péndulo invertido y el modelo 1, en el estado inicial controla y luego se vuelve inestable.

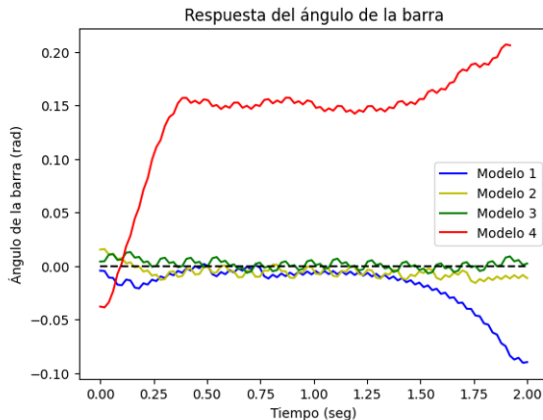


Figura 7. Respuesta de la barra del péndulo invertido respecto al valor de referencia.

En la figura 8, se observa la respuesta de la posición del carro y el cómo cambia en el tiempo. El modelo 4 presenta un cambio exponencial en la posición del carro y eso lo lleva a la inestabilidad.

V. CONCLUSIONES PRELIMINARES

La implementación del algoritmo Deep Q-Learning con un buffer de repetición de experiencias, hizo posible crear un controlador capaz de funcionar en un entorno dinámico no lineal, además de evolucionar constantemente a medida que este es empleado, mostrando sobre todo la capacidad para generalizar experiencia y extraer patrones de información,

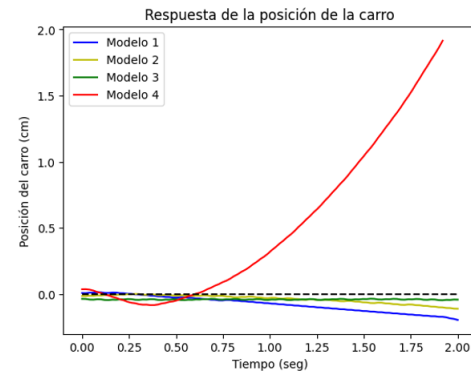


Figura 8. Respuesta de la posición del carro del péndulo invertido respecto al valor de referencia.

características importantes para su aplicación en el campo del control.

Al comparar el rendimiento de los modelos entrenados se encuentra que solo el modelo 2 y 3 fueron capaces de mantener estable el sistema del péndulo invertido, en el caso del modelo 4 a pesar de que era el modelo más robusto dado que era el que mayor cantidad de neuronas poseía, no presentó un rendimiento aceptable, esto probablemente se debe al desvanecimiento del gradiente presentado en modelos neuronales profundos, y en el caso del modelo 1 se evidencia que es necesario que el modelo posea cierto número de parámetros para que este sea capaz de aprender a mantener estable el sistema pendular. La evaluación de este modelo se lleva a cabo en un ambiente simulado y como trabajo futuro se pretende sintonizar la estrategia de control por aprendizaje de refuerzo profundo para probar su desempeño en ambientes reales.

REFERENCIAS

- [1] D. Silver et al., "Mastering the game of Go without human knowledge", *Nature*, vol. 550, n.º 7676, pp. 354-359, octubre de 2017. doi: doi.org/10.1038/nature24270.
- [2] L. P. Kaelbling, M. L. Littman y A. W. Moore, "Reinforcement Learning: A Survey", *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 4, pp. 237-285, mayo de 1996. doi: doi.org/10.1613/jair.301.
- [3] Ozalp R., Varol N.K., Tas,ci B., Ucar A., "A Review of Deep Reinforcement Learning Algorithms and Comparative Results on Inverted Pendulum System", In: Tsihrintzis G., Jain L. (eds) *Machine Learning Paradigms. Learning and Analytics in Intelligent Systems*, Springer, Cham, 2020, vol 18, pp 237-256. doi: doi.org/10.1007/978-3030-49724-8_10.
- [4] G. Velandia, "Modelamiento, Diseño y Simulación de un sistema de control para un Sistema de Doble Péndulo Invertido, Universidad Autónoma de Colombia, 2007.
- [5] A. Ghio and O. E. Ramos, "Q-learning-based Model-free Swing Up Control of an Inverted Pendulum", 2019 IEEE XXVI International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, Peru, 2019, pp. 1-4. doi: [10.1109/INTERCON.2019.8853619](https://doi.org/10.1109/INTERCON.2019.8853619).
- [6] A. G. Barto, R. S. Sutton y C. W. Anderson, "Neuronlike adaptive elements that can solve difficult learning control problems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13, n.º 5, pp. 834-846, septiembre de 1983. doi: doi.org/10.1109/tsmc.1983.6313077.
- [7] V. Mnih et al., "Playing Atari with Deep Reinforcement Learning", *arXiv*, 2013. doi: doi.org/10.48550/arXiv.1312.5602.
- [8] M. van Otterlo and M. Wiering, *Reinforcement Learning and Markov Decision Processes*, adaptation, Learning, and Optimization. Springer Berlin Heidelberg, pp. 3-42, 2012. doi: [10.1007/978-3-642-27645-3_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27645-3_1).
- [9] C. J. C. H. Watkins P. Dayan, "Q-learning", *Machine Learning*, 1992, 279-292.

Modelo para la distribución de combustible aplicando técnicas de enrutamiento de vehículos

Julián Enrique Ramírez Mora¹, Joan Esteban Moreno Hernández², Isaías Julián Sarmiento³, Santiago Omar Caballero Morales⁴

Facultad de Ingeniería en Automatización
Universidad de la Salle

(julianenrique.ramirez,joanesteban.moreno,isaias.julian,santiagoomar.caballero@upaep.mx)

Resumen—Resumen— El transporte de combustible es fundamental para garantizar el desarrollo de la economía, debido a esto, el garantizar la distribución de este producto de forma rentable y eficiente es primordial para las compañías que se dedican a esta actividad. En ese sentido se desarrolla el presente trabajo en una empresa distribuidora de combustibles en Colombia, donde se propone el diseño de un modelo para la optimización del enrutamiento vehicular, ajustado a las necesidades de una red de estaciones de servicio y bajo algunas restricciones propias de la operación y de normatividad vigente aplicable en este sector. El modelo a desarrollar propone la integración de diferentes técnicas, variables y restricciones, como son: el problema de distribución multiproducto con ventanas de tiempo, volumen, demanda, peso, metaheurístico híbrido de búsqueda local considerando una instancia de prueba, disponibilidad de una flota de vehículos con diferentes capacidades y varios compartimientos. El objetivo principal del modelo propuesto es minimizar el costo total de la distribución de los combustibles transportados a las estaciones de servicio.

Palabras Clave—Distribución de combustible, Ventanas de tiempo, CVRP, TSP, Metaheurísticas. .

I. INTRODUCCIÓN

LAS Las organizaciones hoy en día son versátiles, distribuyendo y vendiendo diferentes productos, a diversos clientes y en diferentes puntos de entrega con requerimientos específicos de horarios y días, lo que limita el uso de las unidades de transporte y aumenta la necesidad de aplicar herramientas que permitan la optimización de los procesos. El transporte de hidrocarburos presenta las mismas necesidades de optimización que las demás industrias, buscando un balance entre la rentabilidad de la operación y el análisis económico al momento de abastecer las estaciones de servicio. Por otra parte, se debe contar con el factor normativo el cual limita los parámetros de operación con el decreto único reglamentario 1073 [1] y adicional a esto, las medidas de seguridad

establecidas en el decreto 1609 [2] y en la resolución 4100 [3] la cual determina los límites de peso para el tránsito de vehículos pesados. Además, el marco normativo de la distribución de combustible en Colombia cuenta con otros factores a considerar en la implementación del modelo de optimización para que se ajuste a la realidad de los procesos, y deja ver que la operación de la red de estaciones presenta múltiples limitaciones en múltiples facetas, haciendo que la programación sea considerada compleja. Por otro lado, se deben contemplar horarios puntuales de entrega debido a la demanda en las estaciones de servicio y emplear flotas de vehículos con diferentes capacidades y con múltiples compartimientos. El objetivo es garantizar que las estaciones no se queden sin producto. Hay diferentes destinos de entrega con distintos horarios y días para las descargas. Hay 6 diferentes productos y no todas las estaciones manejan todos los productos. Cada producto tiene una densidad diferente, lo que afecta el volumen de carga por vehículos. Por último, se presentan demoras en la descarga de un servicio, lo que podría dilatar los destinos restantes.

Establecer un modelo de ruteo implica identificar y analizar todas las variables que intervienen dentro de la operación, con el objetivo de aplicar las herramientas adecuadas en la propuesta de optimización. El modelo planteado, se enfoca en definir cuál es la ruta adecuada para minimizar el costo de transporte, teniendo en cuentas las respectivas restricciones como son las capacidades de carga, limitaciones de peso, mezcla de artículos, compartimientos de los camiones, horarios y días de entrega. Uno de los objetivos principales de los análisis logísticos en las organizaciones es minimizar el número de vehículos empleados, reduciendo la distancia total recorrida y con ello la minimización de los costos asociados a la distribución [4].

II. APRENDIZAJE POR REFUERZO

La presente investigación tiene como base la aplicación del Problema del Agente Viajero conocido por sus siglas en inglés como TSP (Travelling Salesman Problem) con algunas de sus variantes y el problema de la mochila, los cuales son consideradas como modelos NP-completos [5]. Estos problemas no tienen una fácil solución y se deben implementar diferentes metodologías “metaheurísticas” caracterizadas por su no –linealidad [6], para encontrar el valor más acertado al

¹ Estudiante de doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. (correo electrónico: julianenrique.ramirez@upaep.edu.mx)

² Estudiante de doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. (correo electrónico: joanesteban.moreno@upaep.edu.mx)

³ Estudiante de doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. (correo electrónico: isaias.julian@upaep.edu.mx)

⁴ Trabaja en el decanato de ingeniería de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. (correo electrónico: santiagoomar.caballero@upaep.mx)

optimo deseado, en este sentido antes de llegar a la solución se debe entender a profundidad cada una de las extensiones con el objetivo de diseñar una herramienta adecuada que permita la obtención del valor objetivo. El análisis matemático dedicado a la optimización de rutas en las operaciones logísticas de las organizaciones es el Problema del Agente Viajero (TSP). El cual consiste en que un viajero visita cada uno de los nodos i (ciudades) exactamente una vez, iniciando y finalizando en el mismo nodo, minimizando la distancia total del viajero [7]. El objetivo de TSP es encontrar el ciclo de costos mínimos que visitan cada vértice exactamente una vez [8]. A continuación, se puede observar el modelo básico del agente viajero, el cual tiene como resultado la construcción de un circuito entre todos los nodos modelados.

F.O.

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ijk} C_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

La función objetivo (1), establece la minimización de la distancia recorrida entre los nodos (i, j) . Por otra parte, las restricciones (2) y (3) definen un modelo tradicional de ruteo en donde cada nodo o destino se debe visitar una sola vez. Adicional a esto, el viajero debe salir de ese nodo para visitar el siguiente hasta terminar con el recorrido.

El VRP es la aplicación del TSP, pero utilizado para el enrutamiento de vehículos, en donde uno o varios conjuntos de clientes son atendidos por una flota de vehículos de capacidad limitada. [9]. El problema de enrutamiento de vehículos (VRP) representa un papel importante hoy en día en temas de costos del transporte y temas ambientales [10]. Se busca minimizar el costo de la distancia recorrida bajo cierto conjunto de restricciones [11]. Además, este modelo impacta en la disminución del tiempo de espera, el uso de los vehículos y la maximización del servicio al cliente [12]. El VRP consiste en determinar un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos o almacenes para satisfacer la demanda de varios clientes dispersos geográficamente [13]. Otra variante de este modelo en función de la capacidad de las unidades de transporte, es conocida por sus siglas en inglés CVRP (Capacitate Vehicle Routing Problem), el cual implica el diseño de rutas de entrega de acuerdo a la capacidad de los vehículos, que es considerada una restricción [14].

El principal objetivo de este modelo es la minimización del costo total de la operación, cumpliendo con las rutas y duración de tiempo [15]. El CVRP se definió como una formulación matemática y una aproximación algorítmica, la cual cubre en parte los parámetros establecidos para la distribución de combustibles, alcanzando resultados positivos, cuidando que las demandas no rebasen la capacidad de las unidades [16].

El modelo de Enrutamiento de Vehículos con Ventana de Tiempo conocida por sus siglas en inglés VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), tiene una restricción adicional conocida como ventanas de tiempo, que son turnos de atención definidos por el cliente [17]. Esto se puede interpretar como si la unidad llega antes, represente un costo, sin embargo, si llega después del tiempo, el costo podría multiplicarse y quizá no se podría ejecutar la descarga. El modelo VRPTW es aplicado normalmente para distribución en supermercados, recolección de basura industrial, enrutamiento de autobuses escolares, distribución de hidrocarburos o energéticos [18]. El modelo VRPTW satisface las restricciones de horarias y de capacidad [19]. Existen otras variantes de este modelo como el de ventanas de tiempo rígidas (VRPTD), ventanas de tiempo múltiples (VRPMTW) y ventanas de tiempo blandas (VRPSTW) [20].

Existe una extensión del VRP conocida como VRP con vehículos con múltiples compartimentos (MCVRP), la cual es utilizada para la distribución de productos en la última milla. Además, se aplica cuando las unidades de transporte llevan mercancías, las cuales no se pueden combinar, y existen casos donde el vehículo va haciendo entregas, y al mismo tiempo recoge las devoluciones de mercancía, y también es usado en la distribución de combustible [21].

De igual forma que las demás variantes, este modelo se enfoca en la disminución de la distancia, generando soluciones de calidad creando bloques entre clientes y productos, clientes con clientes y productos con productos, soportando la solución con la aplicación de diferentes metaheurísticas [22].

Esta técnica es la más utilizada para el transporte de hidrocarburos, debido a la delicadeza del producto, ya que la diversificación del mismo al momento de ser comercializado exige un alto control de calidad y de cumplimiento [23].

El problema de la mochila o KP por sus siglas en inglés (Knapsack Problem), es una de las técnicas más utilizadas donde se tiene un contenedor (mochila) con o sin restricciones, y donde la solución base es mediante la programación entera dicotómica [24]. El problema consiste en buscar la mejor solución a una situación análoga al llenar una mochila, con todo o una parte de un conjunto de objetos, cada uno con un peso y valor específicos [25]. Este modelo de optimización es utilizado a menudo por su sencillez y al mismo tiempo, por su complejidad, este problema también le corresponde a la categoría de problemas NP-Complejos, esto debido a que se considera una secuencia cualquiera que podría ser verificada en tiempo polinomial [26]. Puede ser resumido como un conjunto de n artículos, en donde cada uno de ellos es identificado por un número, con un valor entero y peso, siempre en búsqueda de no exceder la capacidad de la mochila o contenedor [27].

El problema KP es una clase de problemas difíciles de resolver, ya que un algoritmo de fuerza bruta para problemas de este tipo, utiliza tiempo exponencial con respecto al tamaño de la entrada, por lo cual es obligatorio manejar diferentes enfoques que permitan obtener una solución conveniente en un tiempo razonable [28].

Este tipo de problema puede volcarse de mono-objetivo a multi-objetivo si se considera un número determinado de

mochilas, de esta forma el problema es dado a un conjunto de m ítems y un conjunto de mochilas, cuando existen diversas soluciones que exceden la capacidad de la mochila, se aplica un método para corregir dichas infactibilidades, este método remueve ítems de una solución paso a paso hasta que todas las restricciones de capacidad sean satisfechas [29].

Cuando se habla de optimización en la distribución de combustible, se proponen diferentes modelos que emplean la aplicación de heurísticas y de metaheurísticas que se enfocan en los objetivos propuestos como mejorar la satisfacción del cliente, disminuir los tiempos de entrega y los costos del ruteo [30]. Una heurística busca maximizar la ganancia total de la operación después de cruzar los ingresos totales, los costos del enrutamiento y la programación del abastecimiento de un grupo de estaciones de servicio tomando como base un procedimiento para la construcción de rutas [31]. Existen investigaciones que incluyen factores restrictivos ya sean por temas operativos o por regulaciones gubernamentales en el transporte de mercancía y de combustible [32] y [33]. Adicional, uno de los principales problemas en el transporte de hidrocarburos, es la asignación de compartimientos cubriendo la necesidad de diferentes tipos de productos con condiciones de almacenamiento diferentes [34].

III. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Siendo el objetivo de este estudio, el acercamiento a un modelo de optimización de enrutamiento en una empresa de distribución de combustible en Colombia. Se realiza la aplicación de un método de investigación deductivo, mediante las cuales se exploran las diferentes variantes del TSP abordadas por diferentes autores quienes han profundizado en su aplicación, sobre todo en procesos de aprovisionamiento y distribución [35]. La descripción de la metodología para este trabajo es la siguiente:

Se identifica la necesidad de conocer la eficiencia de la flota vehicular de la empresa, para luego proponer y desarrollar la programación adecuada de la misma, para el abastecimiento requerido de las 22 estaciones de servicio y que esta garantice a su vez la maximización del uso de las unidades requeridas y a su vez la minimización de los costos de la red de distribución. Se realiza la revisión de varios modelos existentes relacionados con la programación dinámica requerida para abordar el caso de estudio, como también una exhaustiva consulta bibliográfica de aportaciones recientes en el tratamiento del TSP y sus variantes, buscando la adaptación de un modelo que incluyera las diferentes restricciones de capacidad, tiempo y reglamentaciones, así como factibilidad en la solución del caso.

Se plantea el modelo de programación lineal apropiado que incluya las variables y restricciones que garanticen la optimización del uso de los recursos y la minimización del costo, el cual fue configurado a través de la inclusión de 5 variantes de TSP, El agente viajero Múltiple m-TSP este asumido como un VRP homogéneo DVRP (Distance VRP), VRPTW, (VRP with time windows) y sobre todo como un CVRP (Capacited VRP) es decir como un problema de ruteo de vehículos donde la capacidad de la flota se convierte

en restrictiva para la formulación, llevando este último a la inclusión también del problema de la mochila [36].

Con el modelo planteado se elabora una programación en el software Lingo 19.0 versión académica de manera parcial el cual incluye la cantidad de nodos, esto con el objetivo de tener una herramienta sólida para poder validar las futuras aplicaciones de metaheurísticas al modelo completo.

La empresa distribuidora de combustible, es de origen colombiano, su actividad comercial es la comercialización de combustibles, cuenta con red de veintidós estaciones de servicio ubicadas en la ciudad de Bogotá y sus alrededores, las cuales se suministran desde un CEDI principal ubicado en el municipio de Facatativá en el departamento de Cundinamarca. Los productos que comercializan son los siguientes: Gasolina Corriente oxigenada.

- Gasolina Extra oxigenada.
- Biodiesel al 10 %.
- Gasolina corriente oxigenada y aditivada.
- Gasolina extra oxigenada y aditivada.
- Biodiesel al 10 % aditivado.

Cabe resaltar que cada producto debe ser transportado en compartimientos independientes; por ningún motivo se pueden mezclar, y adicional a esto, cada vehículo puede transportar hasta tres productos por viaje, a excepción de una unidad que tiene la capacidad de transportar cuatro productos, dichas capacidades se pueden identificar en la siguiente tabla:

Tabla I
FLOTA UTILIZADA EN LA DISTRIBUCIÓN DE COMBUSTIBLE

Vehículo	Capacidad Total Carga (gal)	Comp 1 Cargue	Comp 2 Cargue	Comp 3 Cargue	Comp 4 Cargue	Peso vehículo vacío (kg)	Peso max en Balsa (kg)
R58808	11.450	2.500	2.000	3.350	3.600	18.500	53.300
R58809	11.400	4.500	3.350	3.550	0	18.480	53.300
R70659	11.700	3.600	3.600	4.500	0	18.450	53.300
R70660	11.700	3.600	3.600	4.500	0	18.450	53.300
R58810	10.350	3.950	3.100	3.300	0	17.800	49.200
R62312	10.350	4.050	3.400	2.900	0	17.350	49.200
R62313	10.350	4.050	3.400	2.900	0	17.350	49.200
R49657	11.500	4.550	3.350	3.600	0	18.380	53.300
R71735	11.450	4.500	3.350	3.600	0	18.850	53.300
R71736	11.450	4.500	3.350	3.600	0	18.500	53.300
R69581	9.100	3.400	2.800	2.900	0	16.000	41.500
R58816	7.500	3.400	2.000	2.100	0	12.450	32.800
R69340	12.000	4.000	4.000	4.000	0	19.000	53.300
R69359	11.950	3.950	4.000	4.000	0	19.000	253.300
R63780	10.250	4.000	3.350	2.900	0	17.300	49.200
R53509	11.500	4.550	3.350	3.600	0	18.480	43.300

Como se observa en la tabla I, la compañía dispone de dieciséis unidades tracto camiones de diferentes capacidades de volumen para realizar la distribución a las veintidós estaciones. Por otra parte, cada producto transportado cuenta con densidades diferentes, lo que afecta de forma directa la capacidad en volumen de los vehículos debido a las restricciones normativas establecidas en la resolución 4100, dichas densidades se establecen de la siguiente manera:

- Para las Gasolinas 2,7 kg por galón.
- Para los Deseles 3,21 Kg por galón

Es necesario aclarar que los compartimientos no están asociados a un producto determinado permanente, es decir, el compartimiento uno puede ser cargado con el (producto A) para una ruta, y más tarde ser cargado con el producto (producto B). Además, no es necesario que los tres compartimientos vayan a una sola estación.

Por otra parte, cada estación define una hora de recibo, la cual depende del inventario disponible, de volúmenes de venta, y de la disponibilidad del personal que recibe. La ventana de tiempo no es fija, ya que todos los meses puede variar dependiendo del comportamiento de los factores ya mencionados. Esto genera despachos de viajes con poco combustible, aumentando el costo de los fletes por la capacidad que no se usa del vehículo. De igual forma, la operación se enfoca en realizar viajes por Estaciones de Servicio - EDS y no de forma compartida en busca de usar toda la capacidad del camión.

IV. PROPUESTA DEL DISEÑO Y TRADUCCIÓN DEL MODELO

El modelo definido para este problema consiste en una fusión de las diferentes variantes del VRP, las cuales se enfoca en abarcar todas las particularidades de la operación obteniendo como resultado un modelo de enrutamiento selectivo de vehículos con múltiples compartimientos, restricciones de peso y ventanas de tiempo (MCVRPWRTW), el cual se puede definir como un gráfico completo no dirigido, esto debido a que cada nodo se visita una sola vez por vehículo y se representa como $G(N, E)$ en donde N representa el número de nodos y E el número de aristas, para el presente caso el nodo 0, representa la planta de almacenamiento de combustible y un conjunto N que representa el número de estaciones de servicio a atender. Por otra parte, un costo de enrutamiento C_{ij} definido por un tiempo de tránsito t_{ij} y la cantidad transportada QP , está asociado a cada arco (i, j) los cuales pertenecen a E . La flota está identificada con el conjunto $V = (1, \dots, k)$ de vehículos diferentes con m compartimientos, por otra parte, se identifica $P = (1, \dots, m)$ de m productos.

Cada producto p se carga en un compartimiento m con capacidad conocida QP la cual es solicitada por la estación de servicio d_{ij} esta cantidad debe ser menor o igual a la capacidad del vehículo $d_{ij} \leq QP$, esto aplica para cada producto P . El objetivo inicial es que cada solicitud sea atendida por un vehículo, sin embargo, debido a la variedad de productos, la demanda puede ser atendida por varios camiones. Cada vehículo k debe considerar la densidad del producto a transportar WP con el objetivo de no superar el límite de peso permitido por la normatividad W_{kp} , cada estación de servicio define una ventana de tiempo $[a_i, b_i]$ para poder recibir el combustible S_{ik} , esto se define como $a_i \leq S_{ik} \leq b_i$, toda la demanda debe ser atendida por los vehículos disponibles para la operación.

F.O.

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n X_{ijk} C_{ij} QP \quad (4)$$

S.A.

$$\sum_{i \in N} X_{ijk} \geq 1 \quad j \in N', k \in V \quad (5)$$

$$j \in N', k \in V \sum_{i \in N} X_{ijk} = \sum_{i \in N} X_{jik} \quad j \in N', k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in S} X_{ijk} \leq |S| - 1 \quad k \in V, S \subseteq N', |S| \geq 2 \quad (7)$$

$$y_{jkp} \leq \sum_{i \in N} X_{ijk} \quad j \in N', k \in V, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{k \in v} y_{ikp} = 1 \quad j \in N', p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N'} y_{jkp} d_{jp} \leq Q_p \quad k \in V, p \in P \quad (10)$$

$$S_{ik} + t_{ij} - K(1 - X_{ijk}) \leq S_{jk} \quad i, j \in N', k \in V \quad (11)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i \quad i \in N, k \in V \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N'} y_{jkp} d_{jp} \leq W_{kp} \quad k \in V, p \in P \quad (13)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i, j \in N', i \neq j, k \in V \quad (14)$$

$$y_{jkp} \in \{0, 1\} \quad k \in N', k \in V, p \in P, d_{jp} \neq 0 \quad (15)$$

La función objetivo (4) minimiza los costos de los fletes generados en la distribución. La restricción (5) asegura que cada cliente pueda ser visitado como mínimo una vez por cada ruta, la restricción (6) asegura la continuidad de la ruta, es decir la unidad debe abandonar el nodo, la restricción (7) busca que la ruta se realice de forma completa, es decir que no se presenten subtours, la restricción (8) indica que la entrega Y_{jkp} en 0 para cada producto, si el vehículo no atiende a j , la restricción (9) indica que cada producto solicitado por el cliente, es traído por un solo vehículo, La restricción (10) busca garantizar que se respeten las capacidades de los compartimientos de los vehículos $1kj$, la restricción (11) busca que el vehículo $1kj$ no puede llegar a j antes de $s_{ik} + t_{ij}$, si viaja de la i a la j , la restricción (12) define la ventana de tiempo que el vehículo $1kj$ debe realizar el servicio, la restricción (13) establece que se respeten las capacidad de peso del vehículo $1kj$, la restricción (14) establece que X_{ijk} en 1 si y solo si el nodo (i, j) es visitado por el vehículo $1kj$ o cero en caso contrario, la restricción (15) establece que y_{ikp} en uno si y solo si el cliente j recibe el producto $1pj$ el vehículo $1kj$ o cero en caso contrario.

V. CONCLUSIONES

La presente propuesta abre la puerta al desarrollo de un análisis profundo ajustado a la particularidad de las necesidades de una red de distribución, realizando una combinación de diferentes variantes del VRP generando un modelo considerado como N-completo, debido a la necesidad de aplicar métodos combinados para su desarrollo. Además, tiene la peculiaridad de que puede ser solucionado de forma total o parcial que complementa la afirmación inicial, del mismo modo debido a sus diferentes restricciones se hace necesaria la implementación de metaheurísticas para su solución mediante el empleo del software Octave, lo que posibilita encontrar un resultado deseado.

El modelo propuesto en este documento se torna complejo debido a la naturaleza de las restricciones, al analizar varios modelos realizados en este campo, se observa que ninguno abarca la solución a toda la problemática planteada. Por tal motivo, el desarrollo de este modelo se puede contemplar como una propuesta única que se ajusta a la realidad de

la operación y que puede llegar a establecerse como una aportación al conocimiento, con su respectiva validación y pruebas necesarias que soporten su funcionamiento y que garanticen el objetivo deseado.

REFERENCIAS

- [1] C. d. Comercio, "Decreto Único Reglamentario 1073 del 26 de mayo de 2015. Sector Minas y Energía," 2015.
- [2] M. d. transporte, "Decreto 1609 Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera," 2002.
- [3] Resolución 4100 Por el cual se adopta los límites de peso y dimensiones de los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional, 2004.
- [4] D. P. B. Riveros and P. P. B. Silva, "Importancia de la administración logística," *Scientia et technica*, vol. 1, no. 38, 2008. <https://doi.org/10.22517/23447214.3745>
- [5] J. A. V. Flórez, C. J. Z. Grisales, and G. Gatica, "Una aplicación del método MTZ a la solución del problema del agente viajero," *Scientia et technica*, vol. 22, no. 4, pp. 341-344, 2017.
- [6] C. E. Maldonado, "Metaheurísticas y resolución de problemas complejos," *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, vol. 16, no. 33, pp. 169-185, 2016. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v16i33.1938>
- [7] F. Puspita, A. Meitrilova, and S. Yahdin, "Mathematical modelling of traveling salesman problem (TSP) by implementing simulated annealing and genetic algorithms," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1480, no. 1: IOP Publishing, p. 012029.
- [8] Y. Lu, J.-K. Hao, and Q. Wu, "Solving the Clustered Traveling Salesman Problem via TSP methods," *arXiv preprint arXiv:2007.05254*, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.05254>
- [9] J. A. Zapata-Cortes, Á. R. Vélez-Bedoya, and M. D. Arango-Serna, "Mejora del proceso de distribución en una empresa de transporte," *Investigación administrativa*, vol. 49, no. 126, 2020. <https://doi.org/10.35426/iav49n126.08>
- [10] S. Lopera Taborda, "Modelo de mejoramiento de rutas con VRP Solver 3.0 para el caso de una empresa de producción y suministro de mezcla asfáltica: Muvek SAS," *Universidad Santiago de Cali*, 2019.
- [11] J. L. Morales Alvis, "Modelo de ruteo dinámico para la operación de optimización de valores," 2020. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/10335>
- [12] M. Benavente and J. Bustos, "Estado del arte en el problema de ruteo de vehículos (vrp)," *ingeniería*, 2012.
- [13] E. A. B. Muñoz and J. H. C. Sotero, "Diseño de un modelo de optimización de rutas de transporte," *El hombre y la máquina*, no. 32, pp. 52-67, 2009.
- [14] J. P. O. Cardozo, D. O. Toro, and E. M. T. Ocampo, "Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística," *Scientia et technica*, vol. 21, no. 3, pp. 225-233, 2016.
- [15] U. Abdillah and S. Suyanto, "Clustering Nodes and Discretizing Movement to Increase the Effectiveness of HEFA for a CVRP," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 11, no. 4, pp. 774-779, 2020.
- [16] M. Akhtar, M. Hannan, R. Begum, H. Basri, and E. Scavino, "Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization," *Waste Management*, vol. 61, pp. 117-128, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>
- [17] U. P. Zapata and H. C. Ararat, "Un Problema de Enrutamiento del Vehículo con Enfoque de Ventanas de Tiempo para Mejorar el Proceso de Entregas," *Ingeniería*, vol. 25, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15271>
- [18] A. Benítez Perdomo and J. Acosta Molina, "Optimización basada en metaheurísticas: una aproximación a la solución del problema de ruteo de vehículos con ventanas horarias," *Universidad del Rosario*, 2017.
- [19] J. Corstjens, B. Depaire, A. Caris, and K. Sörensen, "A multilevel evaluation method for heuristics with an application to the VRPTW," *International Transactions in Operational Research*, vol. 27, no. 1, pp. 168-196, 2020. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/itor.12631>
- [20] N. Dupin and E. Talbi, "Matheuristics for a VRPTW with competence constraints," in *12th Metaheuristics International Conference MIC2017*, 2017.
- [21] J. Chen and J. Shi, "A multi-compartment vehicle routing problem with time windows for urban distribution—A comparison study on particle swarm optimization algorithms," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 133, pp. 95-106, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.008>
- [22] N. Guo, B. Qian, R. Hu, H. P. Jin, and F. H. Xiang, "A Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Multi-Compartment Vehicle Routing Problem," *Complexity*, vol. 2020, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8839526>
- [23] C. Wang and X. Xu, "Research on Refined Oil Distribution Strategy and Oil Gas Recovery Joint Optimization," in *Proceedings of the Seventh International Forum on Decision Sciences*, 2020: Springer, pp. 57-71.
- [24] J. Aguilar, "Resolución computacional de un problema de optimización combinatorio híbrido," *Ciencia e Ingeniería*, vol. 38, no. 2, pp. 99-106, 2017.
- [25] I. Jiménez-Castellano, B. Hernández-Ocaña, J. Hernández-Torruco, and O. Chávez-Bosquez, "Frameworks basados en metaheurísticas para resolver el problema de la mochila," *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 26, no. 1, pp. 31-43, 2019.
- [26] Y. Adouani, B. Jarboui, and M. Masmoudi, "Efficient matheuristic for the generalised multiple knapsack problem with setup," *European Journal of Industrial Engineering*, vol. 14, no. 5, pp. 715-741, 2020. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2020.109906>
- [27] S. Coniglio, F. Furini, and P. San Segundo, "A new combinatorial branch-and-bound algorithm for the Knapsack Problem with Conflicts," *European Journal of Operational Research*, vol. 289, no. 2, pp. 435-455, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.023>
- [28] Z. Wu, B. Jiang, and H. R. Karimi, "A logarithmic descent direction algorithm for the quadratic knapsack problem," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 369, p. 124854, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.124854>
- [29] J. García, P. Moraga, M. Valenzuela, and H. Pinto, "A db-Scan Hybrid Algorithm: An Application to the Multidimensional Knapsack Problem," *Mathematics*, vol. 8, no. 4, p. 507, 2020. <https://doi.org/10.3390/math8040507>
- [30] L. L. Berry, D. R. Bennett, and C. W. Brown, *Calidad de servicio*. Ediciones Díaz de Santos, 1989.
- [31] F. Cornillier, F. F. Boctor, G. Laporte, and J. Renaud, "A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 191, no. 2, pp. 295-305, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.016>
- [32] L. M. Hvattum, K. Fagerholt, and V. A. Armentano, "Tank allocation problems in maritime bulk shipping," *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 11, pp. 3051-3060, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.002>
- [33] C. Vilhelmsen, J. Larsen, and R. Lusby, "A heuristic and hybrid method for the tank allocation problem in maritime bulk shipping," *4OR*, vol. 14, no. 4, pp. 417-444, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10288-016-0319-x>
- [34] M. Ostermeier and A. Hübner, "Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 269, no. 2, pp. 682-694, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.059>
- [35] L. B. R. Medina, E. C. G. La Rota, and J. A. O. Castro, "Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución," *Ingeniería*, vol. 16, no. 2, pp. 35-55, 2011.
- [36] E. F. Perez Gomez and J. D. Suarez Pacheco, "Diseño y Desarrollo de una Aplicación para la Planeación de Rutas con Condiciones de Flota Capacitada y Ventanas de Tiempo por Medio de Algoritmos Heurísticos y Metaheurísticos," 2017.

Automatización y simulación de un proceso crítico en una empresa TI bajo el enfoque business process management BPM

Claudia Yadira Rodríguez-Ríos¹, Luisa María Piraban-Lozano.²
Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
(claudia.rodriguez,luisa.piraban@mail.escuelaing.edu.co)

Resumen—En este artículo de investigación presenta los resultados de un estudio realizado con el propósito de documentar, automatizar y, simular el proceso crítico de selección y reclutamiento en una pyme del sector TI. Este ejercicio, se realiza bajo el enfoque Business Process Management BPM y pretende dejar registro de una prueba piloto para que la empresa o cualquier lector pueda más adelante replicar este mismo análisis con otros procesos, dando paso a la transferencia de conocimiento entre la universidad y las diferentes áreas organizacionales de las pymes. En este artículo de investigación presenta los resultados de un estudio realizado con el propósito de documentar, automatizar y, simular el proceso crítico de selección y reclutamiento en una pyme del sector TI. Este ejercicio, se realiza bajo el enfoque Business Process Management BPM y pretende dejar registro de una prueba piloto para que la empresa o cualquier lector pueda más adelante replicar este mismo análisis con otros procesos, dando paso a la transferencia de conocimiento entre la universidad y las diferentes áreas organizacionales de las pymes.

Esta investigación se considera pertinente, dado que, en la mayoría de las pymes, los procesos, aunque puede que estén documentados, no están automatizados, lo que puede llevar a incurrir en costos más altos debido a la alta carga de trabajo, mayor número de errores humanos, mayor tiempo de ejecución en las tareas e inexistencia de indicadores de rendimiento y de control de los procesos en tiempo real, traducido a tareas más difíciles, ineficientes e ineficaces. El aporte es presentar el paso a paso de una automatización relativamente sencilla para que en un futuro cercano las pymes puedan implementar la automatización y la simulación de sus propios procesos, esta es la razón para dejar documentado las lecciones aprendidas encontradas en esta investigación. A Ahora bien, para la ejecución de la investigación, en primera instancia, se aborda una revisión de literatura científica, posteriormente, se hace descubrimiento del proceso, en el cual, la Gerencia General de la pyme analizada, indica que el proceso más importante para trabajar en ese momento es el de Reclutamiento y selección de personal, dado el tiempo previsto para la investigación el estudio se limitó a un proceso crítico. Una vez seleccionado este proceso, se empieza con un diagnóstico actual del mismo, mediante entrevistas semiestructuradas a todo el personal involucrado con el proceso, las cuales permitieron diseñar y documentar el proceso en BPMN2.0 en el software Bizagi Modeler®, luego se realiza la automatización del proceso en Bizagi Studio®, y finalmente se realiza la simulación Bizagi

Modeler®, con el fin de que la organización identifique de forma más clara, las actividades y con ello, pueda realizar mejoras en las mismas, por último, se presenta los resultados obtenidos a través de la investigación y las conclusiones del trabajo realizado.

Como resultado, se encuentra que en el subproceso de contratación de candidatos el cual hace parte del proceso selección y reclutamiento, se evidencia una oportunidad de mejora y una disminución en el tiempo de ciclo del proceso, cuando en la versión mejorada se eliminan los reprocesos que actualmente se llevan a cabo, los cuales generan una mayor carga de trabajo a los colaboradores y, por lo tanto, un incremento en los tiempos para ejecutar la actividad. Adicionalmente, se entrega a la empresa la documentación en detalle en notación BPMN2.0, la automatización y una simulación del proceso completo, así como un informe de lecciones aprendidas.

Los resultados obtenidos de la propuesta del escenario 2 constataron que, mediante la propuesta de mejora para la simulación del proceso de selección y reclutamiento modelado con BPMN 2.0, demostraron una significativa mejora de tiempos y costos para la compañía, y mejor aún la carga laboral para el analista de recursos humanos el cual anteriormente era demasiado alta.

De la investigación se concluye que la automatización de procesos teóricamente si disminuye el tiempo de ciclo del proceso, dado que agiliza las actividades de revisión, de aprobación, de calificación de exámenes y pruebas de admisión, las cuales influyen directamente en los costos; que haciendo una proyección anual da un ahorro de hasta el 40 % de costos hora del funcionario que ejecuta estas actividades en la pyme.

Índice de Términos—Automatización de procesos, Business Process Management BPM, Lecciones aprendidas, Simulación de procesos, Transferencia de conocimiento y Recursos humanos.

I. INTRODUCCIÓN

CON el transcurso del tiempo, las empresas han estado en constante búsqueda de un gran desempeño en áreas tales como productividad, calidad y ganancias; es por esta razón que en la actualidad han venido implementando estrategias como Business Process Management (BPM), con el fin de mantener, controlar, mejorar, administrar y optimizar los procesos, y así poder cumplir con los objetivos organizacionales, y mantener un plan de mejoramiento continuo en la misma [1], [2].

Actualmente, algunas organizaciones han comprendido el gran valor que tiene el departamento de recursos humanos, en el sentido de que esta área no solo se centra en seleccionar el personal, sino que, una vez conformado los equipos de trabajos de la compañía, se debe buscar de manera estratégica pilares

¹ Financiamiento: Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con el proyecto DII/P008-2018, del semillero de Investigación Business Process Management, del Centro de Investigaciones en Manufactura y Servicios – CIMSER. C. Y. Rodríguez-Ríos claudia.rodriguez@escuelaing.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3629-1324>.

² L. M. Piraban-Lozano luisa.piraban@mail.escuelaing.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3206-9147> Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

que mejoren cada día la eficiencia y efectividad de las personas, sin embargo, es allí donde muchas de las organizaciones empiezan a perder el rumbo, ya que realizan sus actividades de forma independiente en cada una de las áreas y no consideran importante el transmitir el conocimiento cambiante y constate entre las áreas que componen las compañías [3].

Es por ello, que en el presente artículo además de tener como finalidad documentar la aplicación, automatización y simulación, de un proceso crítico como lo es el seleccionar el personal, pretende documentar las lecciones aprendidas como parte fundamental del aprendizaje organizacional, que será útil en procesos futuros, donde se tengan en cuenta para las respectivas implementaciones de otros procesos. A continuación, se presentan los apartes de antecedentes, donde se documentan de manera general los conceptos teóricos utilizados en el estudio, asimismo, la metodología utilizada, la discusión y resultados, que es la aplicación de la automatización en la empresa, y los resultados de la simulación, las conclusiones y recomendaciones de mejora del proceso, así como los trabajos futuros que se pueden realizar con base en esta investigación y que podrían ampliar el alcance de la misma.

II. ANTECEDENTES

II-A. Automatización de procesos

El autor [3] menciona que la automatización de procesos puede referirse al automatizar cualquier parte del procedimiento y que el trabajo que está contenido dentro de un proceso de negocio, comprende operaciones simples que son parte de una sola actividad de proceso hasta la coordinación automatizada de procesos completos y complejos. La automatización de los procesos industriales, constituye uno de los objetivos más importantes de las empresas, en la incesante tarea de la búsqueda de la competitividad en un entorno cambiante y agresivo [4]. Para la fase de automatización, el software Bizagi Studio® provee un asistente, que, a través de unos pasos, guía la manera de automatizar y ejecutar los procesos de negocio, usando la lógica existente de negocios y herramientas que son fáciles de usar [5].

II-B. Business process management BPM

El BPM se entiende como un sistema de gestión basado en procesos, compuesto por la cultura organizacional que se acompañan por la arquitectura de los procesos, la modelación y el diseño. Adicionalmente, el mejoramiento, el monitoreo y la administración de los sistemas de información, que se entrelazan con las personas, y además se alinean a las estrategias de la organización [6].

Así mismo, el BPM se define como “una disciplina que requiere a las organizaciones cambiar su pensamiento a uno “centrado en procesos”, y que reduzcan su dependencia en estructuras tradicionales y funcionales, de manera que los procesos de negocios se traten como activos a ser valorados, diseñados y explotados por derecho propio” [7]. Como se menciona, el implementar esta estrategia permite a las organizaciones entender, desarrollar y adoptar de forma más clara, un sistema de gestión por procesos, parte de la documentación, dado a que los procesos empresariales suelen ser cambiantes; es allí

donde herramientas como el Business Process Management Suites (BPMS) toman importancia dentro de las empresas, ya que estas permiten automatizar modelos de negocio [8]. Con base en lo anterior se plantea la automatización del proceso, siguiendo los lineamientos de BPM, como base para establecer una guía de los procesos [9].

El objetivo de un algoritmo de aprendizaje reforzado es que el agente aprenda una política π donde dada una función de transición $A \times S \rightarrow S$ maximice la recompensa acumulativa esperada.

II-C. Documentación de los procesos

La documentación de los procesos implica hacer una recopilación de la información existente de la organización, en muchas ocasiones consiste en una entrevista en la cual se identifica cuáles son las actividades que realiza el personal, el lugar en donde se realiza y el tiempo involucrado y cada una de las actividades [10]. De esta forma, según [11], el tener los procesos documentados le permite a la organización lograr los resultados internos que desea y poder tomar decisiones de forma más simple gracias al control y verificación que se hacen en cada una de las actividades, al igual estas entrevistas permiten mencionar problemas y/o dificultades que están evidenciando dentro del proceso, para posteriormente poder implementar oportunidades de mejora.

Una de las aplicaciones donde se documenta los procesos es el software Bizagi Modeler®, el cual es un modelador de procesos, que se basa en el estándar Business Process Model and Notation BPMN 2.0, es una notación gráfica que describe la lógica de los pasos de un proceso [12].

II-D. Recursos humanos y reclutamiento

De acuerdo con [13], “el área de RRHH es importante en una empresa, ya que, el factor humano se ha transformado en un pilar estratégico para lograr y cumplir los objetivos de toda organización”, de igual manera agrega “que es la encargada de generar estrategias y metodologías de trabajo para obtener una mayor eficacia y eficiencia dentro de la organización”. Ahora bien, el Proceso de reclutamiento se encarga de la identificación del personal idóneo, que logre cumplir con las competencias y habilidades necesarias para desarrollar las funciones requeridas, teniendo en cuenta que su desempeño es clave para el avance, logro y uso eficiente de los demás recursos de la organización [14].

II-E. Simulación de los procesos

La simulación se conoce como una herramienta que se utiliza para evaluar el desempeño de un modelo, con diferentes configuraciones y durante largos períodos de tiempo, que permite reducir las probabilidades de incumplir los requerimientos de negocio, eliminar cuellos de botella, evitar sub o sobre-utilización de los recursos y así poder optimizar el rendimiento del sistema [15]. También se usa para comparar varios escenarios diferentes de tal manera que se pueda predecir el comportamiento de cada uno de ellos [16].

Bizagi Modeler®, es el software que permite simular los procesos de negocio bajo el estándar Business Process Simulation BPSim, como estándar que define la especificación para la parametrización y procesamientos de los datos de los modelos BPMN 2.0 [17].

II-F. Transferencia de conocimiento y lecciones aprendidas

La transferencia de conocimiento se encarga del proceso cuando los miembros organizacionales deben transmitir, refinar o renovar su comprensión, sus habilidades y, su experiencia a través de la investigación, adquisición y/o creación de su conocimiento (puede ser nuevo o no), e incluso puede incluir actividades nuevas que impliquen cambios, este se relaciona entonces, con las dificultades de superar barreras funcionales y permitir la interoperabilidad, que facilita el intercambio de significados entre los equipos de trabajo [18].

En muchas organizaciones la transferencia de conocimiento es un gran reto que tienen que enfrentar, dado a que algunas no comprenden la diferencia de transferir el conocimiento y transferir la información, pues lo que hacen es enviar datos y resultados de lo que se hace, lo cual no resulta ser útil para el aprendizaje de los colaboradores, ya que no la comprenden, es por esta razón que algunas organizaciones como Citibank, hace frente a las experiencias de sus colaboradores, por medio de programas de retroalimentación y entrenamientos específicos en todas las áreas, para que todos los equipos de trabajo puedan crear conocimientos a través de sus experiencias las cuales son socializadas [19].

Por otro lado las lecciones aprendidas se definen como “el conocimiento adquirido sobre un proceso o una o varias experiencias, a través de la reflexión y el análisis crítico sobre sus resultados y los factores importantes o condiciones que pueden haber incidido sobre su éxito o fracaso” [20], de manera tal, que si los resultados son positivos se permitan la aplicación y replicación de lo aprendido en otros diseños y proyectos, en caso contrario evitar los errores cometidos, o por lo menos minimizar su efecto [21].

Una de las ventajas de aplicar correctamente todas las experiencias y nuevos conocimientos de los colaboradores es que permiten identificar el lugar y la manera exacta en que se requiere la información en un momento concreto [22], esto hará que los equipos de trabajo puedan resolver todas las inquietudes de manera autónoma y de forma rápida [23].

III. METODOLOGIA

A nivel metodológico, esta investigación es de tipo diagnóstico pues incluye lo descriptivo y cualitativo y se realiza bajo el enfoque Business Process Management BPM [24], aplicado en un estudio de caso siguiendo el protocolo definido por [25], el tipo de diseño es de un solo contexto que corresponde a una empresa de TI, con una única unidad de análisis, que en este caso es el proceso de selección y reclutamiento, las fases del protocolo se describen en la Fig. 1 a continuación:

Ahora bien, para la introducción y propósito, en primera instancia, se aborda una revisión de literatura científica, luego, se hace descubrimiento del proceso de Reclutamiento y selección de personal, para hacer un diagnóstico del mismo, mediante



Figura 1. Protocolo del Estudio de caso. Fuente: Adaptación al modelo de Yin (2003).

entrevistas semiestructuradas a todo el personal involucrado con el proceso, con el fin de documentar y rediseñar el proceso en BPMN2.0 en el software Bizagi Modeler®, luego se realiza la automatización del proceso en Bizagi Studio®, y luego se realiza la simulación Bizagi Modeler®, finalmente se realizan las validaciones correspondientes, a continuación se presentan los resultados obtenidos a través de la investigación y las conclusiones del trabajo realizado.

IV. RESULTADOS

IV-A. Identificación del proceso

Los directivos de la empresa, escogen el proceso de selección y reclutamiento del personal, como proceso crítico para la investigación, debido a que las personas son insumos vitales para esta organización dado el tipo de negocio que es el desarrollo de software y mantenimientos del mismo, en clientes importantes como bancos y empresas del estado entre otros, el acierto en este proceso ha mantenido la empresa en crecimiento en un mercado tan competitivo como el de ahora.

IV-B. Documentación del proceso

Primero se procedió a realizar las entrevistas semiestructuradas, de forma que se pudieran identificar los actores funcionales que intervienen en el proceso y las actividades que hacen dentro del mismo, se identifican dos tipos de inicios y tres roles: a) el analista administrativo de recursos humanos quien está con mayor frecuencia en el proceso y quien toma las primeras decisiones para la selección del candidato, b) el CEO y/o directivos de la compañía quienes aprueban las habilidades y perfil del candidato, y finalmente c) el jefe inmediato quien revisa, evalúa el desempeño del colaborador en el período de prueba, y quien decide si es apto para la ejecución del cargo en la compañía como se observa en la Fig. 2

Al momento de documentar y revisar los componentes que tienen las actividades predecesoras y antecesoras, se halló una oportunidad de mejora en el subproceso de contratación de candidato debido a que se están realizando validaciones innecesarias como se ve en esto vuelve deficiente el proceso al tener retrasos de tiempo en la ejecución.

IV-C. Automatización del proceso

Ahora bien, el primer paso se dio creando un nuevo proyecto en la herramienta Bizagi Studio®, por medio de la definición de datos como el primer paso requerido para su ejecución.

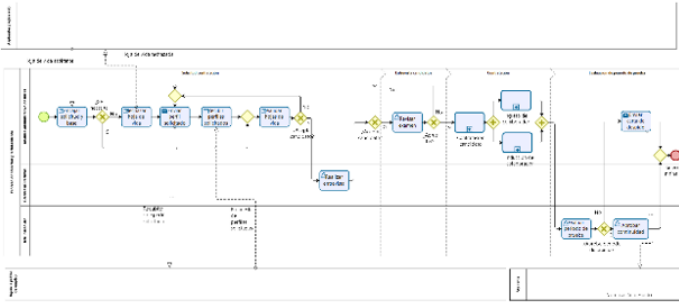


Figura 2. Diagrama de Proceso, Selección y Reclutamiento en Bizagi Modeler. Fuente: Elaboración propia.

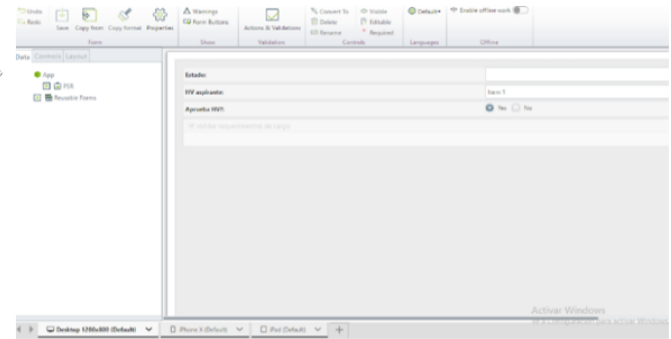


Figura 4. Definición de la figura validar hojas de vida. Fuente: Elaboración propia.

Es por esto, que para la construcción de dicho modelo de datos, se estructuró una relación de entidades (son aquellos objetos reales como personas y lugares que son identificados de manera única) y sus correspondientes atributos (entendidas como las propiedades que describen cada entidad y deben a su vez ser identificados de forma única), es importante mencionar, que para que la estructura del modelo de datos se presente de manera organizada y coherente, se tiene que proporcionar una “llanea foránea” es decir, una relación entre sí, entre las entidades y sus atributos, de forma tal, que se determine el almacenamiento y acceso de los datos de todo el modelo de código creado como se muestra en la Fig.3:

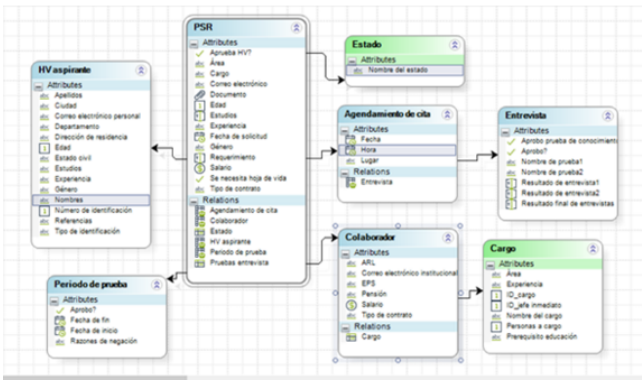


Figura 3. Base de datos del Proceso Selección y Reclutamiento. Fuente: Elaboración propia.

Una vez estructurada y definida la base de datos, se procede a definir formas gestionando todas las interfaces de usuario que se utilizara en las tareas humanas, es decir, a definir la información que se necesitara para el proceso y las ejecuciones y validaciones que se necesitaran para mostrar a los usuarios finales lo que se desea como se ve en la Fig.4:

IV-D. Simulación del proceso

El primer paso denotado como Validación de Proceso se hizo el análisis de probabilidad de los eventos que comprende las actividades del proceso presentados en la Tabla I

Después se procede a programar en las compuertas de decisión las probabilidades correspondientes cada uno de los flujos del proceso. Así, por ejemplo, en la muestra como en la

Tabla I
ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE LOS EVENTOS

Evento	Descripción	Probabilidad
1	Luego de recibir la hoja de vida, que probabilidad hay de que los que se postulan se necesiten para el cargo que se necesita	Si: 90 % No: 10 %
2	Cuando se revisa que el perfil de la hoja de vida se adecua al puesto, se revisa que probabilidad hay de que se acepte el candidato para el otro el siguiente filtro	Si: 80 % No: 20 %
3	Cuando el administrador de RRHH decide aceptar el candidato, la probabilidad de que el gerente considere pertinente el perfil del candidato para el puesto ofertado	Si: 95 % No: 5 %
4	Después de realizar la entrevista en conjunto el administrador de recursos humanos y los gerentes, cuál es la probabilidad que el candidato para al siguiente filtro.	Si: 90 % No: 10 %
5	Luego de realizar el examen de conocimiento según el puesto de trabajo, cuál es la probabilidad que de que obtengan el puntaje mínimo para obtener el cargo.	Si: 98 % No: 2 %
6	Cuando se termina el periodo de prueba del colaborador, cual es la probabilidad de que se le dé	Si: 98 % No: 2 %

compuerta ¿Se necesita perfil? Tiene un 90 % de probabilidad de que el flujo de trabajo “Si” tome ese camino, y por el “No” sea de 10 % la probabilidad. Asimismo, se procede a ingresar la información de la activación de instancias del proceso, en el Evento de inicio.

Seguidamente en el nivel de Análisis de tiempo se define la cantidad de tiempo en el que una actividad necesita procesas un token, es decir el tiempo que tarda desde que el token entra hasta que sale de la actividad. Al momento de ejecutar la simulación se evidencia se puede evidenciar el número de instancias completadas como se mencionó en el primer nivel, el tiempo promedio por actividad y el tiempo total de procesamiento de la misma.

Una vez finalizado el nivel dos se procede a seguir con el nivel 3 Análisis de recursos, en donde se asignan el personal que se necesita para cada una de las tareas y el respectivo costo por hora de trabajo de cada uno junto con el costo asociado a la actividad. Al ejecutar la simulación se evidencia el porcentaje de tiempo en el que un agente estuvo ocupado durante el proceso, el costo de la utilización del agente. Debido a que se evidencia un alto costo y tiempo en el escenario actual de la compañía, se propone un nuevo escenario en el cual, se decide suprimir actividades como “validar los requerimientos de cargo” por parte de los directivos, ya que el analista de recursos humanos ya lo hizo previamente al revisar en la hoja de vida del aspirante los requisitos académicos y de experiencia.

Al comparar los dos escenarios se evidencia una reducción

del 40 % de los costos del escenario actual al escenario 2 que es el propuesto como se muestra en la Fig. 5. Consolidado de resultados del escenario propuesto y actual del proceso. Fuente: Elaboración propia debido a que la carga laboral para el analista de recursos humanos disminuyo en un 17,63 %.

Recurso	Escenario	Porcentaje	Costo fijo hora	Costo variable hora	Costo total
Analista administrativo de RR.HH.	Escenario 1	100,00 %	0	114.053,200	114.053,200
Analista administrativo de RR.HH.	Escenario 2	82,37 %	0	48.193,530	48.193,530
Gerentes / directivos	Escenario 1	6,11 %	0	1.896.666,67	1.896.666,67
Gerentes / directivos	Escenario 2	6,24 %	0	2.120,000	2.120,000
Asesores / asesores	Escenario 1	10,00 %	0	28.800,000	28.800,000
Asesores / asesores	Escenario 2	26,79 %	0	26.200,000	26.200,000
Total Escenario 1			0	144.750.887,67	144.750.887,67
Total Escenario 2			0	86.513,530	86.513,530

Figura 5. Consolidado de resultados del escenario propuesto y actual del proceso. Fuente: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

La implementación del sistema BPM dentro de la compañía, le proporciona a cada uno de los colaboradores de la organización herramientas para analizar los procesos y por ende poder realizar mejoras continuas que añaden valor frente a la competencia.

Se espera que se pueda fomentar capacitaciones a todo el personal, de forma que los agentes que intervinieron en los estudios y mejoras de los procesos críticos, no sean los únicos que puedan replicar el modelo cuando se originen nuevos procesos o mejoras de los mismos dentro de la compañía.

El modelo de automatización simplifico el proceso, debido a su velocidad para realizar las tareas, reduce el error humano lo que representa una eficiencia y eficacia en los procesos al ser precisa y rápida.

Los resultados obtenidos de la propuesta del escenario 2 constataron que, mediante la propuesta de mejora para la simulación del proceso de selección y reclutamiento modelado con BPMN 2.0, demostraron una significativa mejora de tiempos y costos para la compañía, y mejor aún la carga laboral para el analista de recursos humanos el cual anteriormente era demasiado alto.

Este estudio sirve para que en el futuro organizaciones del mismo y otros sectores puedan implementar la automatización y simulación de un proceso crítico para un enfoque BPM.

REFERENCIAS

- [1] N. S. Blet and J. L. Simón, "SOA en Automatización de Pymes Manufactureras," *Iberoam. J. Ind. Eng.*, vol. 3, no. 6, pp. 189–208, 2011, doi: 10.13084/2175-8018.v03n06a12.
- [2] K. J. Janssen and F. C. W. Nendels, "Business Processes Management in the Netherlands and Portugal: The Effect of BPM Maturity on BPM Performance," *J. Int. Technol. Inf. Manag.*, vol. 24, no. 1–13, 2015.
- [3] M. Dumas, M. La Rosa, J. Mendling, and H. A. Reijers, *Fundamentals of business process management: Second Edition*. 2018.
- [4] E. Moreno, *Automatización de Procesos Industriales*. 2017.
- [5] J. S. Ortega and J. M. León, "Análisis y Diseño de una Solucion para Gestión de Procesos de Negocios (BPM) en una Imprenta ELelectronica," p. 1.147, 2010.

- [6] C. Y. Rodríguez, "Qué es Business Process Management (BPM). Definiciones y conceptos," *Rev. la Esc. Colomb. Ing.*, vol. 25, no. 98, pp. 23–29, 2015, doi: ISSN 0121-5132.
- [7] D. Thennakoon, W. Bandara, E. French, and P. Mathiesen, "What do we know about business process management training? Current status of related research and a way forward," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 478–500, 2018, doi: 10.1108/BPMJ-09-2016-0180.
- [8] A. R. Dunie, D. Miers, J. Wong, M. Kerremans, K. Iijima, and P. Vincent, "Licensed for Distribution Magic Quadrant for Intelligent Business Process Management Suites," pp. 1–55, 2019, [Online]. Available: <https://www.gartner.com/doc/reprints?id=1-66AAPG8&ct=190131&st=sb>.
- [9] K. López Supelano, K., "Modelo de automatización de procesos para un sistema de gestión a partir de un esquema de documentación basado en Business Process Management (BPM)," *Univ. Empres.*, vol. 17, no. 29, pp. 131–155, 2016, doi: 10.12804/rev.univ.empresa.29.2015.06.
- [10] C. Jaime, "Guía para el diseño y documentación de procesos," no. April 2017, pp. 2007–2014, 2017.
- [11] A. Arreola, "Documentación de Procesos de Control Interno," 2019.
- [12] D. E. Jacinto Sandoval, "Rediseño de procesos para mejorar la eficacia del proceso de practicas pre-profesionales supervisadas de las escuelas profesionales adscritas a la facultad de Ingeniería de la UPAO Sucursal Piura aplicando Bizagi Modeler bajo el estandard Business Process," p. 96, 2019.
- [13] G. Veronica, "Universida Autonoma San Francisco," Universidad Autónoma San Francisco, 2021.
- [14] S. Del Carpio, Nikole; Espinoza, "Talento humano mediante la metodología BPM en países de habla hispana durante los últimos 8 años," pp. 1–40, 2020.
- [15] D. Rowman, "BizAgi Process Modeler," *bizAgi Process Modeler*, pp. 1–50, 2009.
- [16] D. Key, "La Simulación De Procesos , Manufacturing," *La simulación procesos, clave en la toma Decis.*, vol. 83, pp. 221–227, 2008.
- [17] Sánchez, Cubillos, and D. C. Bogotá, "Universidad de los Andes Facultad de Ingeniería de Sistemas y Computación Proyecto de Grado Simulación de Procesos Presentado por Asesor Mario Sánchez Puccini Contenido," 2019.
- [18] D. Binci, S. Belisari, and A. Appolloni, "BPM and change management: An ambidextrous perspective," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 26, no. 1, pp. 1–23, 2020, doi: 10.1108/BPMJ-06-2018-0158.
- [19] L. García and S. Bernal, "Caracterizaión de los informes de sostenibilidad de los bancos Davivienda S.A para los periodos 2012 a 2016," vol. 1, no. 69, pp. 5–24, 2018.
- [20] E. Luna and L. Rodríguez, "¿Cómo documentar Lecciones Aprendidas? Guía para la preparación de una Nota de Conocimiento," *BID - Banco Interam. Desarro.*, vol. 1, no. 1, p. 6, 2011.
- [21] J. L. Rodríguez Sánchez and S. Calcerrada Serrano, "The importance of managing recruitment, selection and socialization process in the bus sector: a success case Contenido," *Issn*, vol. 41, p. 18, 2020.
- [22] M. A. Fernando and A. Morales, "Gestión del conocimiento para generar ventaja competitiva en organizaciones petroleras," *Orbis*, 2015, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/709/70932870004.pdf>.
- [23] J. Melero, P. Angulo, and J. J. De Benito Martín, "La universidad ante el reto de la transferencia del conocimiento 2.0: Análisis de las herramientas digitales a disposición del gestor de transferencia," *Investig. Eur. Dir. y Econ. la Empres.*, vol. 17, no. 3, pp. 111–126, 2011, doi: 10.1016/S1135-2523(12)60123-3.
- [24] C. Y. Rodríguez-Rios and J. E. Roa-Sánchez, "Model to measure the effect of the integration of information in business processes. Example: bidding process for an industry," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 28, no. 1, pp. 81–112, 2022, doi: 10.1108/BPMJ-09-2020-0432.
- [25] R. Yin, "CASE STUDY RESEARCH Design and Methods," vol. 3, p. 179, 2003.

WMS-Based Web Environment for Ground Truth Semantic Segmentation Creation of Earth Surface Digital Images

J. A. Valero, Member¹, NIDE, J. L. Herrera, Member, NIDE¹, and K. Quijano, Member, GEIPER¹

Abstract—In general, in the design of semantic segmentation algorithms for digital images of the earth’s surface, the quality assessment stage of the semantic segmentations produced is essential. Also, particularly in the design of semantic segmentation algorithms based on deep learning, the training stage is of utmost importance. These two phases require the availability of earth’s surface digital images together with their ground truth semantic segmentations for benchmarking or training. However, there is a scarcity of earth’s surface datasets, which have ground truth semantic segmentations. This paper presents some results of a research that is being carried out by the GEIPER research hotbed of the NIDE research group of the District University. The research purpose is to produce an environment based on a web map service (WMS) that allow the creation of ground truth semantic segmentations performed by human photo-interpreters for a given set of earth’s surface digital images in an iterative fashion.

Index Terms—Semantic segmentation, quality assessment, ground truth.

I. INTRODUCTION

MANY of the publicly available resources for algorithm assessment, such as the assessment framework proposed in [4] and its update in [1], provide an empirical basis for evaluating the quality of segmentations produced by segmentation algorithms, but only for computer vision images focusing on natural images, so the generation of ground truth semantic segmentations is required for digital images of the earth’s surface in geographical environments of greater generality.

This paper presents some results of the institutionalized research titled “Banco de imágenes para la aplicación de pruebas comparativas de desempeño (Benchmarking) de algoritmos de segmentación de imágenes”, which is being carried out by the GEIPER research hotbed of the NIDE research group. As part of the research, the implementation of a web environment has been explored for the creation of sets of semantic segmentations that will become ground truth semantic segmentations for the digital images owned by GEIPER hotbed, which will go to be used in the quality assessment phase of semantic segmentation algorithms, as well as in the training phase in the case of algorithms based on deep learning.

The approach that has been followed is the one proposed in [4], starting from the generation of a set of semantic segmentations for the same digital image produced by different photo-interpreters. As in [4], it is considered that the segmentations can be evaluated by comparing them with those produced by multiple human photo-interpreters and that there must be considerable consistency between the different human segmentations of the same image so that they can be considered as reliable.

The research purpose is to produce a web computing environment that allow to produce ground truth semantic segmentations for a given set of earth’s surface digital images in an iterative fashion. At the end of each ground truth production iteration, a quality check is performed both visually and by applying performance evaluation tests using a computational framework for benchmarking based on the one proposed in [1]

A computational platform composed of three tools has been implemented. (i) the first is based on a web map server (WMS) [5] that allows public access both to the digital images of the earth’s surface that must be segmented, and to the set of semantic segmentations that have been previously produced by photo interpreters at each iteration for comparative visual inspection. (ii) The second is based on the Moodle platform, through which the production process of the semantic segmentations is managed from their assignment to each of the photo-interpreters, until the final delivery of the semantic segmentations produced. (iii) Finally, the third tool, which is based on the benchmarking computational environment proposed in [1], allows to perform the consistency tests at the end of each production iteration.

In the implemented computing platform, a reference segmentation survey is carried out, based on a radar satellite image of the municipality of Cárquez (Cundinamarca) which was segmented by photo-interpreters volunteers (members of the GEIPER research hotbed). The QGIS Desktop free software was used for elaborating reference semantic segmentations.

The interaction scheme based on a segmentation client that interacts through a WMS server allows other previous reference semantic segmentations to be available for a manual semantic segmentation task with the purpose of collectively building the necessary knowledge to produce more consistent ground truth segmentations. On the other hand, the Moodle-based workforce management scheme encourages the production of reference semantic segmentations in various file formats. In the following, in section II, the data set used

¹ This work is supported in part by the Francisco José de Caldas District University, Bogotá, Colombia under institutionalized research titled “Banco de imágenes para la aplicación de pruebas comparativas de desempeño (Benchmarking) de algoritmos de segmentación de imágenes”. Corresponding author: J. A. Valero. Co-first author: J. L. Herrera, Member, NIDE. Co-second author: K. Quijano, Member, GEIPER.

is presented. In section III, the implemented web computing environment is presented in more detail. Finally, in section IV, some conclusions and future work are presented.

II. DATA

In the reference segmentation survey, it was used a radar satellite image of Cáqueza (Cundinamarca) municipality (Fig. 1 shows the image metadata).

Metadata item	Value
SAR Frequency Band	X
Instruments	capella-radar-3
Datetime	2021-06-12T14:48:43.343984
Start Datetime	2021-06-12T14:48:30.979216
End Datetime	2021-06-12T14:48:55.708753
Platform	capella-3
Constellation	capella
SAR Instrument	Mode spotlight
SAR Center Frequency	9.65 GHz
SAR Polarizations	HH
SAT	Orbit State:descending
SAR Product Type	GEO
SAR Pixel Spacing Range	0.42 m
SAR Pixel Spacing Azimuth	0.42 m
SAR Looks Range	1
SAR Looks Azimuth	9
SAR Looks Equivalent Number	9
SAR Resolution Range	0.5 m
Resolution Ground Range	0.74 m
SAR Resolution Azimuth	0.64 m
Incidence Angle	41.9°
Look Angle	38.1°
Squint Angle	-0.1°
Orbital Plane	97°
SAR Observation Direction	left
Collect Id	6cf322d2-3935-4803-a587-d8dae7295005
Product Category	custom
Billable Area	25567987.965252765
Date Created	2021-06-12T17:34:36.939Z
Date Updated	2021-06-13T01:35:18.911Z

Fig. 1. IMAGE METADATA

The image was divided into regular 4X4 grid on Fig 2. Each of windows was assigned to at least three photo-interpreters volunteers (members of the GEIPER research hotbed).

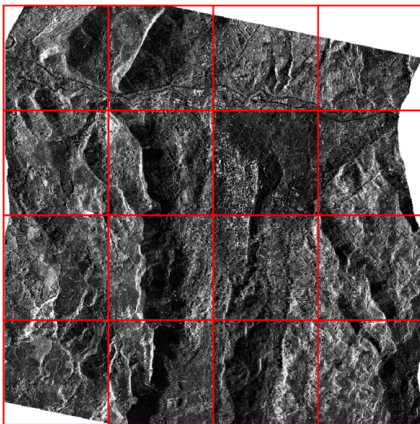


Fig. 2. Radar satellite image used in the reference segmentation survey.

The third level of the field classification established by the Agustín Coddazi Geographic Institute was established as the semantic detail level.

III. SYSTEM ARCHITECTURE

The architecture used is made up of two main components (Fig. 4): (i) a web portal based on a storage File system, a WMS server, and a quality assessment environment; and (ii) a ground truth survey environment based on a Moodle-based manager, ground truth segmentation shapefile set and QGISDesktop-based Client.

A. Storage File system

Both each window of the digital image and the set of its reference semantic segmentations are housed in a specific folder assigned to the Apache web server. QGIS Desktop is used as a segmentation client (SegmentationClient component in Fig. 3) at each reference semantic segmentation production iteration.

Once a photo interpreter completes the semantic segmentation process, it uses the assigned resource in the Moodle platform to perform the delivery. Each produced semantic segmentation is finally downloaded to the respective folder of the Apache web server waiting for the other segmentations of the same image window. When the set of segmentations is complete, the consistency evaluation process begins.

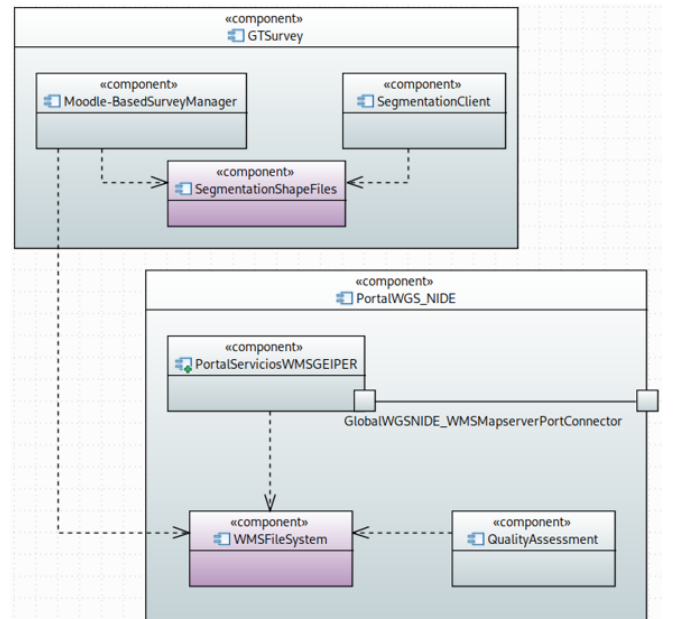


Fig. 3. System architecture for reference semantic segmentations access and survey.

B. WMS server

The WMS service portal (PortalServiciosWMSGEIPER in Fig. 3) has been configured using a free software platform mounted on Apache as a web server and QGIS Server as a specific application server for the WMS implementation. A Moodle platform was used to manage the semantic segmentations survey from photo-interpreters window image assignment to final delivery of the semantic segmentations produced.

It is currently in the process of evaluating and improving the results obtained, which can be viewed as a reference from any client software with capabilities to access resources provided by WMS servers

C. Quality assessment environment

The benchmarking computational environment proposed in [1], was implemented to perform the consistency tests at the end of each semantic segmentation production iteration. Matlab is used to perform each quality assessment task using the API produced by [1].

At the end of an iteration each semantic segmentation is compared with the others in the same window to establish individual consistency. The total consistency is calculated as the average of all individuals. The iterative process ends when the total consistency is good enough.

IV. FINAL CONSIDERATIONS AND FUTURE WORK

Given the knowledge and preparation previously acquired by the photo-interpreters, it was initially considered that the survey of the reference semantic segmentations would take only one iteration. However, the survey pilot carried out allowed to establish that, given the type of radar image used as well as the little field knowledge of the geographical area, the consistency of the set of semantic segmentations obtained after the first iteration was much lower than expected, even with just a visual inspection. To provide a good quality level for the consistency of the set of segmentations, the iterative procedure finally established was completed with an automated evaluation of the consistency quality at the end of each semantic segmentation production iteration.

The interaction scheme based on a segmentation client that interacts through a WMS server allows other previous reference semantic segmentations to be available to collectively build the necessary knowledge to produce consistent ground truth segmentations. However, this scheme favors the production of reference semantic segmentations in various representation formats and can only be used asynchronously due to the delivery intermediation introduced using the Moodle platform.

A scheme with a client controlled by a web feature service (WFS) in Fig. 4 could restrict the structure to the one provided by it, while the edits made in the local segmentation client are sent to the client in the exchange format also stipulated by WFS server.

This implies that the semantic segmentations produced would be immediately available as a reference in the WMS server, by simplifying the delivery process and reducing the time required to have it available. Now, it is also clear that by taking control of the WFS server, the guarantees that must be provided for client identity verification and access rights verification also fall on it, so it will be necessary to design and implement a strategy to give achieve these two purposes.

V. ACKNOWLEDGMENT

Thanks to Procalculo Prosis SAS, cappella images distributor in Colombia, with whom it was possible to obtain the image used.

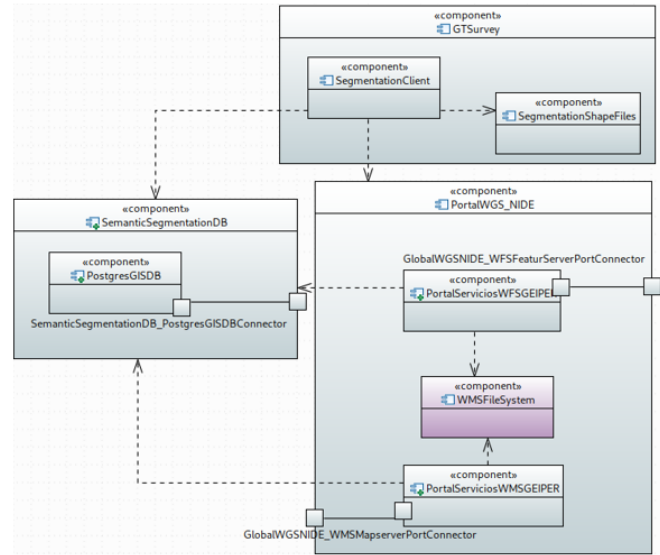


Fig. 4. System architecture for reference semantic segmentations access and survey based on a WFS server.

REFERENCES

- [1] Arbelaez, P., Maire, M., Fowlkes, C. & Malik, J. (2011), 'Contour detection and hierarchical image segmentation', IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 33(5), 898–916. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2010.161>.
- [2] Kroll, P. & Kruchten, P. (2003), The Rational Unified Process Made Easy: A Practitioner's Guide to the RUP, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=937979>.
- [3] Luna, Brian. (2020), 'Portal de servicios web geográfico para el semillero de investigación GEIPER.', Tesis de pregrado en Ingeniería Catastral y Geodesia, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- [4] Martin, D. et al. (2001). "A Database of Human Segmented Natural Images and its Application to Evaluating Segmentation Algorithms and Measuring Ecological Statistics." In: Proc. 8th Int'l Conf. Computer Vision. Vol. 2, pp. 416–423.
- [5] OGC. (2006) OpenGIS® Consortium. Web Map Server Implementation Specification. Jeff de la Beaujardiere. <https://bit.ly/2LRxZfj>.



J. A. Valero is NIDE research group member and professor of the Faculty of Engineering of the Francisco José de Caldas District University. He is the main researcher of the institutionalized research titled "Banco de imágenes para la aplicación de pruebas comparativas de desempeño (Benchmarking) de algoritmos de segmentación de imágenes".



K. Quijano is GEIPER research hotbed member and a cadastral engineering and geodesy student at Caldas District University, Bogotá, Colombia. And

finally **J. L. Herrera** is NIDE research group member and professor of the Faculty of Engineering of the Francisco José de Caldas District University. He the GEIPER research hotbed CO. Photograph not available at the time of publication

Multiobjective-Multiperiod Location and Routing Mathematical Model Applied to Hazardous Waste Management

Cabrales, P. A., Camacho, J. C., Arias, J. E.

School of Industrial and Business Studies, Industrial University of Santander

paula2208423@correo.uis.edu.co, jccampin@correo.uis.edu.co, jearias@uis.edu.co

Abstract—Urbanization and economic growth worldwide cause a greater consumption of goods and services, increasing waste generation. According to its source, waste is classified as residential, industrial, commercial, institutional, and construction waste, all of which produce Hazardous Waste. Hazardous waste affects human health and the environment due to its corrosive, reactive, ignitable, and toxic characteristics. For this reason, Hazardous Waste Management Systems (HWMS) have been created, which are responsible for the collection, distribution, treatment, reuse, and disposal of this waste. The literature has addressed these systems as multiobjective location and routing problems. This study proposes a mathematical optimization model with multiple objectives for the multi-period hazardous waste location and routing problem, a condition slightly studied in the literature. The model considers two objectives simultaneously: first, minimization of the total cost for facility location and waste collection, and second, minimization of transport risk related to the people exposed on the routes. Numerical experiments are computed with GAMS software and demonstrate the validity of the developed model. Computational results help decision-makers define collection routes for hazardous waste in all periods and the location of the system's facilities, including treatment, recycling, and disposal centers.

Index Terms—Multiobjective Optimization, Location and Routing Problem, Hazardous Waste, Waste Management, Multiple Periods.

I. INTRODUCTION

IN recent decades, population growth, urbanization, and economic development have caused an increase in waste generation [1]. High levels of waste produce pollution and contamination that negatively impact public health and the preservation of natural resources. In particular, Hazardous waste has attracted special attention in environmental issues due to the risk it represents in collection, transportation, treatment, and disposal activities [2]. Hazardous waste possesses at least one of the following characteristics: ignitability, corrosiveness, reactivity, or toxicity [3]. For this reason, hazardous waste not appropriately managed can affect the environment and human health [4]. Regulatory authorities of developed countries have studied the policies required for adequately managing this waste and their optimal planning. Therefore, implementing Hazardous Waste Management Systems (HWMS) corresponds to an opportunity to guarantee economic viability and safety for people and the environment in the collection, distribution, treatment, reuse, and disposal of hazardous waste.

The planning of these systems considers several operational, tactical, and strategical decisions, such as carefully selecting the facilities for processing or eliminating hazardous waste and determining the transport routes that generate the least risk [5]. To deal with this problem, researchers have implemented optimization models based on operations research techniques, which help decision makers solve these decisions efficiently [6]. The most studied optimization problem for HWMS is the Hazardous Waste Location-Routing Problem (HWLRP), a combination between the Facility Location Problem (FLP) and the Vehicle Routing Problem (VRP), which are well-known in logistics operations. The connection of these two problems allows to select treatment, recycling, or disposal facilities and simultaneously determine the routes that transport hazardous waste from waste generation nodes to the selected facilities. It is supported in the literature that considering these problems separately can increase systems costs [7].

However, HWMS ensures safe and cost-effective activities; consequently, most models in the literature use multiobjective optimization. Cost and risk minimization are the most common objectives. The selection of the safest routes and the farthest facilities can increase transport and location costs; in contrast, the lowest price can represent a high risk for exposed people and the environment [2]. Therefore, in this study, we propose a multiobjective mathematical model for hazardous waste location and routing problem that allows:

- Determining the location of the system facilities;
- Selecting the routes for waste collection;
- Establishing the transport process between facilities;

Additionally, considering the importance of ensuring an effective system and closer the problem to real conditions for waste collection, we formulate routing and transport decisions for multiple periods. Few studies in the literature propose multi-period hazardous waste location and routing problems.

II. LITERATURE REVIEW

Hazardous waste location- routing problem has been studied over the years to encourage well-organized practices to manage this waste from generation to elimination. As we said before, HWLRP is usually a multiobjective programming model. Accordingly, this section reviews the most relevant mathematical models with multiple objectives in the literature. Thirty-four scientific papers were analyzed from 1989 until

2022, as shown in Fig.31art:fig1. Zografos & Samara [8] proposed a multiobjective HWLRP for the first time in 1989 that simultaneously optimized three minimization objectives: site risk, transportation risk, and storage time, to determine the location of the disposal sites and the routes for waste collection. Considering economic issues, ReVelle et al. [9] developed a model to minimize transportation costs and risk. While, Current & Ratick [10] proposed an additional objective: maximize the equity in the distribution of risk, also formulated by Giannikos [10] and Zhang et al. [11]. Previously studies managed only one type of hazardous waste. List & Mirchandani [12] were the first to propose a model with different kinds of hazardous waste and multiple treatment technologies.

Alumur & Kara [3], following the study of Nema & Gupta [13], considered conditions ignored in the literature to include substantial real-life aspects. Waste-technology compatibility and the concept of recycling were a novelty in this model that allowed the location of treatment sites, disposal centers, and the transportation of different types of waste according to compatibility limitations to minimize risks and costs. In 2013, Samanlioglu [14] presented one of the most relevant network designs for hazardous waste management available in the literature: waste generation nodes, three locations (treatment center, recycling center, disposal facility), and transport of waste residue between facilities. Consequently, most studies have tried to model this distribution network considering different characteristics. However, waste collection in generation nodes had been presented only as a transport process between facilities, ignoring that the Location-Routing Problem (LRP) incorporates Vehicle Routing Problem (VRP) issues. For this reason, Rabbani et al. [15] developed a new mathematical model based on the network design presented by [14] but incorporated VRP for waste collection decisions into the problem. Additionally, to address different types of waste, they considered a heterogeneous fleet of vehicles to manage waste-waste compatibility requirements (because of its dangerous characteristics, hazardous waste has to be collected separately). Rabbani et al. [16] extended this research by modelling the problem under stochastic parameters and proposed a planning horizon for multiple periods for routing decisions and transporting between facilities for the first time. Similar works were formulated in [17], [18].

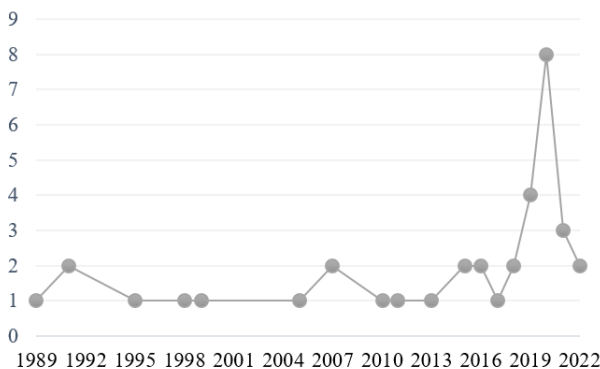


Fig. 1. Number of publications by year

In HWLRP, studies formulate models to minimize:

- Total cost, including the cost for opening facilities and the routing and transport cost;
- Site risk, related to the exposed people near the located facilities;
- Transport risk, related to the exposed people near the opened routes;

However, recent works have tried to deal with other objectives. For example, Hu et al. [19] incorporated a multi-objective problem with time windows to maximize customer satisfaction. The level of satisfaction is related to the arrival time established by each client. Similarly, Rabbani et al. [18] proposed the only work for hazardous waste management to optimize workload balance (according to the importance of increasing employee productivity). As a result, they described a time window model with three objectives: costs, risk, and workload balance.

Alternatively, some researchers have studied environmental conditions in their models in line with sustainable supply chain management challenges and circular economics. Farrokhi-Asl et al. [20] evaluated fuel consumption and CO2 emissions costs and the environmental impact of a multi-objective sustainable waste collection problem. Furthermore, Delfani et al. [21] introduced the Green Location and Routing Problem (GLRP) applied to hazardous waste. They developed a model that minimizes total costs, transport and site risk, and CO2 emissions. Zabihian-Bisheh et al. [22] addressed a similar work.

Finally, the latest studies expose problems related to the COVID-19 pandemic. The work of Tirkolaee et al. [23] is an example of a location and routing problem with time windows for medical waste management. Likewise, Raeisi & Jafarzadeh [24] presented an HWLRP to minimize the risk of COVID-19 infection from transporting hazardous waste.

A. Multi-period Hazardous Waste Management System

Waste management involves activities that change with time. For example, waste collection frequency can be once a day, three times a week, or once a week. In consequence, considering multi-period models for HWLRP represent an opportunity to simulate real-life conditions, but only a few studies have attempted to manage it. Tunalioğlu et al. [25] considered a location-routing problem to minimize costs for facility location and collection of Olive Oil Mill Wastewater (OMWW). This hazardous waste can be collected from oil mills and delivered to the treatment facilities at different periods. Ma & Li [26] handled a multiobjective-multiperiod vehicle routing problem for hazardous waste collection. The model aimed to minimize cost and transport risk and maximize the risk stability in all periods.

In the context of multiobjective HWLRP, Zhao & Huang [27] addressed a multi-period planning horizon in their model for the location of facilities and waste transportation. In contrast, Rabbani et al. [16] integrated location, inventory and routing decisions in a multiperiod model; however, the location of facilities is made only once at the beginning of the planning horizon.

III. PROBLEM DESCRIPTION

This study presents a multiobjective location and routing problem for the design of a hazardous waste management system. The model represents the distribution network proposed in [14] and extended with VRP decisions in [15] and [16], as shown in Fig. 2. The system includes a central depot, a set of waste generation nodes, and three types of facilities: treatment center, recycling center and disposal facility. The vehicles depart from the depot, collecting the waste at generation nodes, sending their load to a treatment or recycling center and returning to the depot. In treatment centers, transformation processes generate two types of waste: recyclable and non-recyclable. The first is sent to recycling centers, while the second is sent to a disposal facility. Similarly, the recycling centers produce waste residue transported to a disposal facility for elimination.

In summary, the model seeks to deal with three decisions: (1) determining the location of the system facilities at the beginning of the planning horizon; (2) selecting the routes that vehicles have to travel for waste collection in each period, and (3) establishing the quantity of waste that is transported between the selected facilities. These decisions aim to minimize total systems costs and risks. Additionally, the model considers the following assumptions:

- All parameters are deterministic;
- Treatment, recycling and disposal facilities have restricted capacities;
- Generation nodes produce various types of waste;
- The vehicle fleet is heterogeneous;
- The planning horizon regard multiple periods for routing and transport decisions;
- Waste production in each generation node is known and variable by period;
- There is a penalty cost for the waste not collected at a generation node. Hence, collecting all waste production at one generation point per period is not supposed to be mandatory.

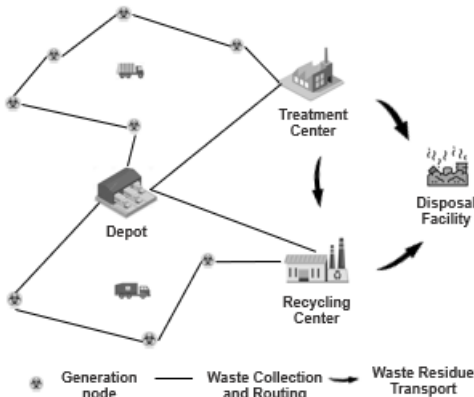


Fig. 2. Distribution Network.

As a result, waste uncollected in a period must be collected in the next period immediately.

IV. METHODOLOGY

A. Model Formulation

Following the distribution network, let's denote sets for location facilities: D means the depot, G represents generation nodes, T indicates treatment centers, R signifies recycling centers, and F represents disposal facilities. Different types of waste are designated as W , while a set of vehicles is defined as V . The planning horizon consists of P periods.

Parameters mainly include transportation costs, location of facilities, the number of people exposed, waste generation in each node by period, facilities capacities, percentage of recycling and mass reduction in centers, vehicle capacities, and minimum amount of waste collected. At the same time, decision variables are binary for location and routing decisions and continuous for quantities of waste transported between facilities. According to this, the model is formulated with the equations for objective functions and constraints.

B. Weighted Sums Method

The weighted sums method transforms the multiobjective model into a single objective problem. This method multiplies each objective by a non-negative weight or coefficient, aggregating all the weighted objectives into a single objective function [26]. Decision-makers can designate various coefficients according to the importance of each objective to explore different solution scenarios.

C. Numerical Experiments

A set of small-scale problems are developed and computed to validate the model in GAMS software. The numerical experiments are hypothetical and far from representing real-life situations. Because of the model complexity (NP-Hard), exact methods can only deal with small instances. Large-scale problems need heuristics and metaheuristics to obtain efficient computational results.

D. Analysis

V. CONCLUSION

Hazardous waste affects human health and the environment. For this reason, guaranteeing its proper management is essential for governments and regulatory entities worldwide. Furthermore, the design of hazardous waste management systems allows collection, treatment, reuse, and elimination of this waste efficiently. Consequently, to help decision-makers obtain economic and social benefits, the literature on this problem focuses on formulating mathematical models.

Considering the limited studies existing in the literature, this multiobjective - multiperiod model for HWLRP promotes advances in the research gap. Moreover, the minimum quantity of waste generation to open vehicle routes is a novelty. Numerical experiments validate the developed model's applicability but represent a significant computational effort. Therefore, future research in multi-period HWLRP can implement metaheuristics to solve large-scale problems for this model. In addition, other directions can incorporate additional objectives different to minimize cost and risk.

REFERENCES

- [1] H. Yu and W. D. Solvang, "An improved multi-objective programming with augmented ϵ -constraint method for hazardous waste location-routing problems," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 6, 2016, doi: 10.3390/ijerph13060548.
- [2] I. Giannikos, "A multiobjective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 104, no. 2, pp. 333–342, 1998, doi: 10.1016/S0377-2217(97)00188-4.
- [3] S. Alumur and B. Y. Kara, "A new model for the hazardous waste location-routing problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 34, no. 5, pp. 1406–1423, 2007, doi: 10.1016/j.cor.2005.06.012.
- [4] J. Zhao, L. Huang, D. H. Lee, and Q. Peng, "Improved approaches to the network design problem in regional hazardous waste management systems," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 88, pp. 52–75, 2016, doi: 10.1016/j.tre.2016.02.002.
- [5] O. Yilmaz, B. Y. Kara, and U. Yetis, "Hazardous waste management system design under population and environmental impact considerations," *J. Environ. Manage.*, vol. 203, pp. 720–731, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.015.
- [6] G. Ghiani, A. Manni, E. Manni, and M. Tormaldo, "The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 11, pp. 1949–1956, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.026>.
- [7] S. Salhi and G. K. Rand, "The effect of ignoring routes when locating depots," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 39, no. 2, pp. 150–156, 1989, [Online]. Available: <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:ejores:v:39:y:1989:i:2:p:150-156>.
- [8] K. Zografos and S. Samara, "A Combined Location-Routing Model for Hazardous Waste Transportation and Disposal," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1245, pp. 52–59, 1989.
- [9] D. S. Charles ReVelle, Jared Cohon, "Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes," *Transportation Science*, 25(2), pp. 138–145, 1991.
- [10] J. Current and S. Ratlick, "A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials," *Locat. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 187–201, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0966-8349\(95\)00013-5](https://doi.org/10.1016/0966-8349(95)00013-5).
- [11] M. Zhang, Y. Ma, and K. Weng, "Location-routing model of hazardous materials distribution system based on risk bottleneck," in *Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on Services Systems and Services Management*, 2005., 2005, vol. 1, pp. 362–368 Vol. 1, doi: 10.1109/ICSSSM.2005.1499496.
- [12] G. List and P. Mirchandani, "Integrated network/planar multiobjective model for routing and siting for hazardous materials and wastes," *Transportation Science*, vol. 25, no. 2, pp. 146–156, 1991, doi: 10.1287/trsc.25.2.146.
- [13] A. K. Nema and S. K. Gupta, "Optimization of regional hazardous waste management systems: an improved formulation," *Waste Manag.*, vol. 19, no. 7, pp. 441–451, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)00241-X](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00241-X).
- [14] F. Samanlioglu, "A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 226, no. 2, pp. 332–340, 2013, doi: 10.1016/j.ejor.2012.11.019.
- [15] M. Rabbani, R. Heidari, H. Farrokhi-Asl, and N. Rahimi, "Using meta-heuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types," *J. Clean. Prod.*, vol. 170, pp. 227–241, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.09.029.
- [16] M. Rabbani, R. Heidari, and R. Yazdanparast, "A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 272, no. 3, pp. 945–961, 2019, doi: 10.1016/j.ejor.2018.07.024.
- [17] M. Rabbani, S. Amirhossein Sadati, and H. Farrokhi-Asl, "Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 148, no. January, p. 106692, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106692.
- [18] M. Rabbani, A. Nikoubin, and H. Farrokhi-Asl, "Using modified meta-heuristic algorithms to solve a hazardous waste collection problem considering workload balancing and service time windows," *Soft Comput.*, vol. 25, no. 3, pp. 1885–1912, 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05261-4.
- [19] H. Hu, X. Li, Y. Zhang, C. Shang, and S. Zhang, "Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 128, no. January 2018, pp. 861–876, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.10.044.
- [20] H. Farrokhi-Asl, A. Makui, A. Jabbarzadeh, and F. Barzinpour, *Solving a multi-objective sustainable waste collection problem considering a new collection network*, vol. 20, no. 4. Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [21] F. Delfani, A. Kazemi, S. M. Seyedhosseini, and S. T. A. Niaki, "A Green Hazardous Waste Location-routing Problem Considering the Risks Associated with Transportation and Population," *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, vol. 33, no. 11, pp. 2272–2284, 2020, doi: 10.5829/ije.2020.33.11b.18.
- [22] A. Zabihian-bisheh, H. R. Vandchali, V. Kayvanfar, and F. Werner, "A multi-objective sustainable planning for a real hazardous waste production problem," no. Samanlioglu 2013, pp. 1–25.
- [23] J. E. B. Tirkolaee, P. Abbasian, and G. W. Weber, "Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak," *Sci. Total Environ.*, vol. 756, p. 143607, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143607.
- [24] D. Raeisi and S. Jafarzadeh Ghouschi, "A robust fuzzy multi-objective location-routing problem for hazardous waste under uncertain conditions," *Appl. Intell.*, 2022, doi: 10.1007/s10489-022-03334-5.
- [25] R. Tunalioğlu, Ç. Koç, and T. Bektaş, "A multiperiod location-routing problem arising in the collection of Olive Oil Mill Wastewater," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 67, no. 7, pp. 1012–1024, 2016, doi: 10.1057/jors.2015.121.
- [26] H. Ma and X. Li, "Multi-Period Hazardous Waste Collection Planning with Consideration of Risk Stability," *J. Ind. Manag. Optim.*, vol. 17, no. 1, pp. 393–408, 2021, doi: 10.3934/jimo.2019117.
- [27] J. Zhao and L. Huang, "Multi-period network design problem in regional hazardous waste management systems," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 11, 2019, doi: 10.3390/ijerph16112042.

Solución del Problema de Localización, Ruteo e Inventarios en Ambientes Multiobjetivo

Carlos Arturo Salazar-Vargas, Eliana Mirledy Toro-Ocampo, Ramón Alfonso Gallego-Rendón.

Grupo de investigación GAOPE

Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia

(carlos.salazar,elianam,ragr@utp.edu.co)

Resumen—El problema de ruteo de vehículos y manejo de inventarios (IRP, por sus siglas en inglés para Inventory Routing Problem), es una combinación de problemas de manejo de inventarios y ruteo de vehículos en la que un conjunto de proveedores deben entregar sus productos a un número de clientes dispersos geográficamente. Para dar solución al problema, se debe determinar cuál será el conjunto de rutas de distribución para cada vehículo, qué vehículos estarán activos qué días, el volumen de producto a enviar a cada cliente, junto con los niveles de inventario que debe de mantener el proveedor para cada periodo de tiempo dentro del horizonte de planificación de tal forma que se minimicen los costos de inventario y de distribución.

I. INTRODUCCION

A diferencia del problema clásico de ruteo de vehículos, la cantidad a enviar a cada cliente se convierte en una variable de decisión, por lo cual no necesariamente se debe visitar a todos los clientes todos los días a lo largo del horizonte de planificación, teniendo en cuenta que, los niveles de inventario de los clientes deben ser suficientes para cubrir la demanda en los días que no son visitados por algún vehículo [1]. El problema posee diversas variantes estructurales que permiten que éste pueda ser adaptado a diferentes situaciones, entre las variantes más comunes se encuentran las siguientes: Horizonte de planificación finito o infinito, un depósito o múltiples depósitos, un cliente o varios clientes, permitir o no la escasez de inventario, flota de vehículos homogénea o heterogénea, uno o múltiples vehículos, uno o varios productos, uno o múltiples objetivos y demanda determinista o estocástica [2]. Sea $G = (N, E)$ un grafo completo sin dirección, en el que N es el conjunto de ubicaciones (nodos) y E es el conjunto de arcos entre ubicaciones. El nodo 1 es el depósito correspondiente a la ubicación del proveedor y los nodos ≥ 2 corresponden al conjunto de clientes. Un costo m_{ij} se asocia a cada arco (i, j) . Asumimos que los costos M_{ij} satisfacen la desigualdad triangular. El horizonte de planificación $T = \{1 \dots H\}$ se compone de H días. Cada cliente $i \in \mathbb{N}$ está asociado con una capacidad de almacenamiento C_i y una demanda por periodo D_{it} , $i \in \mathbb{N}, t \in T$. La cantidad producida en el depósito en el periodo t se denota como D_{1t} mientras que I_{it} es el nivel de inventario inicial en la ubicación $i \in \mathbb{N} \forall i \in 2, \dots, n$ y O_i corresponde al mismo, para el primer periodo de tiempo. Una flota K de vehículos de capacidad homogénea V está disponible para distribuir las mercancías desde el depósito a

los clientes [3]. Para disminuir la complejidad computacional del modelo matemático, se plantearon los siguientes supuestos:

- Distribución de un único producto, desde un depósito, a un conjunto de clientes geográficamente dispersos durante un horizonte de planificación determinado.
- Flota de vehículos de capacidad homogénea.
- La demanda del proveedor y de los clientes es conocida, para los clientes representa sus ventas o salidas de inventario durante el periodo.
- Los costos de mantener el inventario no son tomados en consideración; sin embargo, se pretende mantener el nivel de inventario de los clientes, al final de cada periodo, lo más bajo posible.
- Al inicio del horizonte de planificación se conoce el nivel de inventario del depósito y de los clientes.
- Los costos de transporte son equivalentes a la distancia entre los nodos.

I-A. Parámetros del modelo

T = Horizonte de planificación.

N = Número de nodos.

K = Número de vehículos.

V = Capacidad de los vehículos.

D_{it} = Demanda del nodo i en el periodo t .

C_i = Capacidad de almacenamiento del cliente i .

O_i = Inventario inicial en el nodo i .

M_{ij} = Matriz de costos asociada a cada arco (i, j) .

cx = Coordenadas en x del nodo i .

cy = Coordenadas en y del nodo i .

I-B. Variables de decisión del modelo

I_{it} = Inventario del nodo i al inicio del periodo t .

F_{it} = Inventario del nodo i al final del periodo t .

Q_{it}^k = Cantidad entregada al cliente i por el vehículo k en el periodo t .

Y_{ij}^{kt} = Variable binaria que determina si un arco (i, j) es atravesado por un vehículo k en el periodo t .

Z_{it}^k = Variable binaria igual a 1 si un nodo i es visitado por un vehículo k en el periodo t .

A_{kt} = Variable que determina si un vehículo k es utilizado en un periodo t .

U_i = Variable de ayuda para la eliminación de subtours.

I-C. Modelo matemático

$$\begin{aligned}
(1) \quad & \text{Minimizar } \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T M_{ij} Y_{ij}^{kt} \\
(2) \quad & \text{S.a } O_i = F_{i0} \quad \forall i \in N \\
(3) \quad & I_{it} = F_{it-1} \quad \forall i \in N, t \in T \\
(4) \quad & F_{1t} = I_{1t} + D_{1t} - \sum_{j=2}^N \sum_{k=1}^K Q_{jt}^k \quad t \in T \\
(5) \quad & F_{it} = I_{it} - D_{it} + \sum_{k=1}^K Q_{jt}^k \quad \forall i \in N (i \geq 2), t \in T \\
(6) \quad & Q_{jt}^k \leq C_j Z_{jt}^k \quad \forall j \in N (j \geq 2), k \in K, t \in T \\
(7) \quad & \sum_{j=2}^N Q_{jt}^k \leq V_k \quad k \in K, t \in T \\
(8) \quad & \sum_{k=1}^K Z_{jt}^k \leq 1 \quad \forall j \in N (j \geq 2), t \in T, k \in K \\
(9) \quad & F_{it} \leq C_i \quad \forall i \in N, t \in T \\
(10) \quad & \sum_{j=1}^N Y_{ij}^{kt} = \sum_{j=1}^N Y_{ji}^{kt} \quad \forall < i, j > \in N, k \in K, t \in T \\
(11) \quad & \sum_{j=1}^N Y_{1j}^{kt} = A_{kt} \quad k \in K, t \in T \\
(12) \quad & \sum_{j=1}^N Y_{ji}^{kt} \geq Z_{jt}^k \quad \forall < i, j > \in N, k \in K, t \in T \\
(13) \quad & U_i - U_j \leq V (1 - Y_{ij}^{kt}) - D_{jt} \\
(14) \quad & \forall < i, j > \in N (j \neq i, j > 1), k \in K, t \in T \\
(15) \quad & I_{it} \geq 0 \quad \forall i \in N, t \in T \\
(16) \quad & F_{it} \geq 0 \quad \forall i \in N, t \in T \\
(17) \quad & Q_{it}^k \geq 0 \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \\
(18) \quad & Y_{ij}^{kt} \in \{0, 1\} \quad < i, j > \in N (i \neq j), k \in K, t \in T \\
(19) \quad & Z_{it}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, t \in T, k \in K \\
(20) \quad & A_{kt} \in \{0, 1\} \quad k \in K, t \in T
\end{aligned}$$

La función objetivo (1), pretende minimizar los costos incurridos por los desplazamientos entre nodos. La restricción (2) define el inventario inicial en el periodo 1, así como (3) define, a partir del segundo periodo de tiempo, al inventario inicial como el equivalente a lo que me quedó del periodo anterior.

Para el proveedor, (4) establece su inventario al final de cada periodo como la suma del inventario inicial con la producción del periodo, menos las cantidades enviadas a los clientes.

En el caso de los clientes, (5) define el inventario al final del periodo de estos como la suma de lo que les quedó del periodo anterior con las cantidades recibidas por el proveedor, menos las ventas o salidas de inventario.

La restricción ((6)) garantiza que la cantidad entregada en el nodo i sea menor a la capacidad de almacenamiento del nodo,

así como (7) permite que la cantidad a entregar al cliente i no exceda la capacidad del vehículo.

La restricción (8) define que un nodo solo será atendido por un vehículo una única vez en el mismo periodo de tiempo.

Por otro lado, (9) asegura que el inventario final no exceda la capacidad de almacenamiento del nodo.

La restricción (10) garantiza la conexidad de la red, (11) el que las rutas inicien en el proveedor, (12) define que cada vez que se visita un nodo, este será abastecido y (13) evita que se generen subtours en cada periodo de tiempo t .

La restricción (14) impide que se presente desabastecimientos en los clientes y en el proveedor. Finalmente, el conjunto de restricciones (15) –(19) garantizan la integridad y las condiciones de no negatividad en las variables de decisión [4].

Para las pruebas del modelo se empleó la librería previamente construida del PhD Leandro C. Coelho y Canada Research Chair in Integrated Logistics que se puede encontrar en <https://www.leandro-coelho.com/instances/inventory-routing/>. Los escenarios empleados fueron tomados con base en el conjunto de instancias propuestos en [5] para el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos con un único vehículo y producto, concretamente: `abs1n15`, el tiempo de corrida máximo del modelo, para arrojar una solución, se estableció en 10.000 segundos, un poco menos de 3 horas. Dado a que los datos que ofrece esta biblioteca difieren ligeramente de la estructura propuesta en nuestro modelo, se corrió bajo las siguientes condiciones y ajustes:

- El número de vehículos se fijó en cuatro (4).
- La capacidad de cada vehículo corresponde a cuatrocientos (400).
- El inventario inicial del proveedor equivale a la mitad de la suma de los inventarios iniciales de los clientes.
- La capacidad de almacenamiento del proveedor se estableció como la suma de las capacidades de los clientes más el veinte por ciento (+20 %) para $t = 3$ y más el cincuenta por ciento (+50 %) para $t = 6$.
- La producción del proveedor se fijó, para un horizonte de planificación $t = 3$, únicamente para el día uno (1), siendo esta equivalente a la suma de la demanda de los clientes en el primer día. Esto viéndolo desde el punto de vista de que la producción establecida para el proveedor corresponde a la disponibilidad de inventario que tendrá para todo el horizonte de planificación (t), más no literalmente a la cantidad de producto elaborado diariamente. Por otro lado, para un $t = 6$, se analizan escenarios con una disponibilidad diaria del proveedor estimada, equivalente al 80 % de la suma de las demandas de los clientes cada día.

El modelo matemático fue escrito en el lenguaje de programación AMPL, resuelto por medio del software de optimización CPLEX y se validó con diferentes casos de prueba adaptados de la librería mencionada anteriormente. Con el fin de encontrar los alcances y limitaciones del modelo, se realizaron las pruebas para los mismos clientes bajo 2 horizontes de planificación, 3 y 6 periodos respectivamente, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para la

instancia de prueba que contiene 6 clientes bajo 3 y 6 periodos de tiempo.

Tabla I
MOVIMIENTOS DEL PROVEEDOR PARA T=3 Y N=7

COSTO	1728	relmipgap 0	
Periodo	1	2	3
Inventario inicial	235	45	45
Producción	330	0	0
Despachos	520	0	0
Inventario final	45	45	45

Tabla II
RUTAS GENERADAS PARA T=3 Y N=7

Periodo	Clientes visitados					
1	Ruta	1	2	3	5	1
	Cantidad entregada		12	118	198	
	Ruta	1	6	4	7	1
	Cantidad entregada		89	64	39	

Tabla III
MOVIMIENTOS DEL PROVEEDOR PARA T=6 Y N=7

COSTO	3806	relmipgap 0.431538				
Periodo	1	2	3	4	5	6
Inventario inicial	235	499	35	299	163	45
Producción	264	264	264	264	264	264
Despachos	0	728	0	400	382	0
Inventario final	499	35	299	163	45	309

Tabla IV
RUTAS GENERADAS PARA T=6 Y N=7

Periodo	Clientes visitados						
2	Ruta	1	6	4	7	1	
	Cantidad entregada		219	64	117		
	Ruta	1	2	3	5	1	
4	Cantidad entregada		12	118	198		
	Ruta	1	4	2	3	5	1
	Cantidad entregada		64	36	118	182	
5	Ruta	1	6	4	7	3	5
	Cantidad entregada		137	32	39	59	115

Tabla V
MOVIMIENTOS DEL PROVEEDOR PARA T=6 Y N=13

COSTO	6291	relmipgap 0.518677				
Periodo	1	2	3	4	5	6
Inventario inicial	434	544	228	390	60	137
Producción	468	468	468	468	468	468
Despachos	358	784	306	798	391	0
Inventario final	544	228	390	60	137	605

Los despachos realizados por el proveedor de la tabla anterior se pueden apreciar en las siguientes ilustraciones:

Los resultados obtenidos para los diferentes casos de prueba confirman que el modelo presenta un mejor desempeño para casos con un horizonte de planificación pequeño y que cumple con lo esperado en lo referente a manejo de bajos volúmenes de inventario y generación de rutas óptimas para la entrega

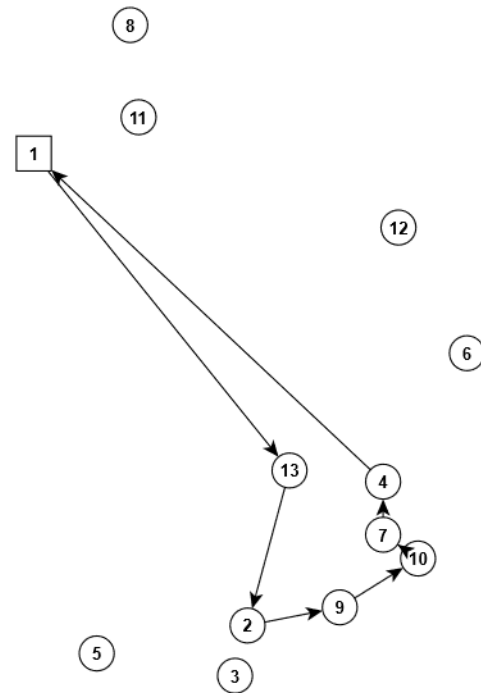


Figura 1. Rutas para la instancia T=6 y N=13 en el periodo 1

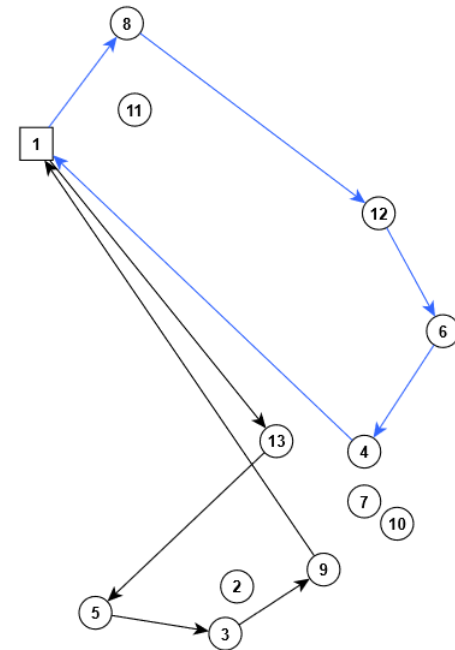


Figura 2. Rutas para la instancia T=6 y n=13 en el periodo 2

del producto a lo largo del horizonte de planificación, entre los resultados más relevantes se encuentran los siguientes:

- No se realizan entregas todos los días, sin embargo, se satisface la demanda del cliente y éste no queda desabastecido en ningún periodo del horizonte de planificación.
- Se logra optimizar la cantidad de vehículos a comprar o subcontratar.
- Se mantiene el inventario del proveedor y de los clientes

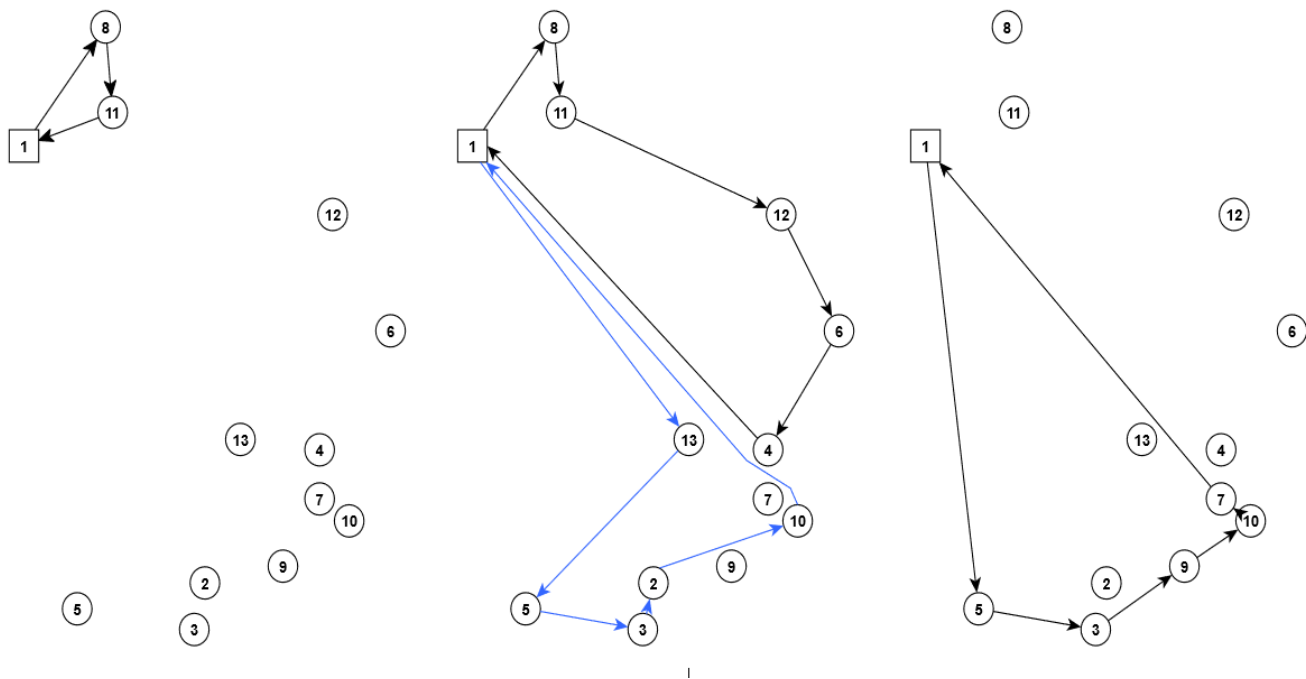


Figura 3. Rutas para la instancia T=6 y n=13 en el periodo 2

lo más bajo posible al final del horizonte de planificación.

- Con base en el modelo se pueden generar estudios de capacidad y potencia necesaria de los vehículos para realizar las entregas de forma más eficiente.
- Es posible realizar un análisis de sensibilidad financiero para la compra de flota propia y compararlo contra los costos de subcontratación del vehículo o del servicio.
- Al programar las entregas se permite organizar de manera más eficiente a los colaboradores dentro horarios que no incurran en horas extras ni dominicales.
- En otros escenarios cuando se producen más rutas en un día que vehículos disponibles (K), indica que se deben hacer viajes extra, subcontratar vehículos de acuerdo con la disponibilidad de tiempo o estudiar la posibilidad de ampliar la capacidad de los vehículos.

Con apoyo de la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira, actualmente se desarrolla una estrategia de solución multiobjetivo que minimice los tiempos de procesamiento y permita gestionar una flota de vehículos heterogénea conformada por vehículos convencionales, eléctricos y/o de tracción humana, así como mejorar los tiempos de entrega al usuario final, buscando disminuir los costos de transporte, costos de almacenamiento de inventarios e impactos ambientales, considerando la posibilidad de incluir escenarios estocásticos.

REFERENCIAS

- [1] R. J. S. Atiencia and R. A. Garcia, "Optimización del Reabastecimiento de una Red de Cajeros Automáticos con Estimación Difusa de la Demanda," *Revista Tecnológica - ESPOL*, vol. 25, no. 2, Dec. 2012, <http://200.10.147.88/index.php/tecnologica/article/view/120>
- [2] L. C. Coelho, J.-F. Cordeau, and G. Laporte, "Thirty Years of Inventory Routing," *Transportation Science*, vol. 48, no. 1, pp. 1–19, Feb. 2014, doi: 10.1287/trsc.2013.0472.
- [3] C. Archetti, L. C. Coelho, and M. Grazia Speranza, "An exact algorithm for the inventory routing problem with logistic ratio," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 131, pp. 96–107, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.tre.2019.09.016.
- [4] M. Arismendi Ramírez and C. A. Salazar Vargas, "Diseño de una cadena de suministro con un único producto usando programación lineal entera," *repositorio.utp.edu.co*, 2021, <https://repositorio.utp.edu.co/items/6191fc2e-90d3-474a-8b86-e87bcdcebb7>
- [5] C. Archetti, L. Bertazzi, G. Laporte, and M. G. Speranza, "A Branch-and-Cut Algorithm for a Vendor-Managed Inventory-Routing Problem," *Transportation Science*, vol. 41, no. 3, pp. 382–391, Aug. 2007, doi: 10.1287/trsc.1060.0188.

Estudio comparativo del comportamiento y atención de los incidentes de la línea de emergencia en salud en pre COVID-19 y COVID-19 en la ciudad de Bogotá.

Jhohan Andrés Sánchez-Moreno¹, Juan Carlos Figueroa-García, Miembro Senior IEE².

Universidad Francisco José de Caldas

jhoasanchezm@correo.udistrital.edu.co, jcfigueroag@udistrital.edu.co

Resumen—La presente investigación realiza un estudio comparativo del Sistema de Emergencias Médicas, específicamente de la gestión en la atención prehospitalaria realizada por el Centro Regulador de Urgencias y Emergencias -CRUE de la ciudad de Bogotá D.C, para ello, se toman dos grandes momentos de estudio: El primero hará referencia a los dos años previos a la pandemia de la COVID-19 y el segundo, durante los años 2020 y 2021 que representaron una situación de alta demanda de atención. En consecuencia, se caracteriza el sistema por medio de técnicas de análisis de datos con un componente geoespacial y posteriormente, se realiza el comparativo entre los dos momentos de estudio. Los resultados nos permiten identificar los cambios en el comportamiento de los incidentes, la atención que se brindó y los factores claves que intervienen en el proceso.

Palabras Clave—Análisis de datos, Datos Geoespaciales, Sistema de Emergencias Médicas, Urgencias, COVID-19, Vehículos de emergencia.

I. INTRODUCCION

EL Centro Regulador de Urgencias y Emergencias - CRUE de la Secretaría Distrital de Salud, es la entidad encargada de coordinar la atención y resolución de las urgencias médicas, las emergencias y los desastres que se presentan en la ciudad de Bogotá a través del Sistema de Emergencias Médicas -SEM [1], el cual contiene las directrices para el funcionamiento y respuesta de los incidentes (solicitudes que ingresan al centro operativo de la Subdirección CRUE para su atención en salud y que son captados por medio del Número Único de Emergencia- Línea 123), teniendo en cuenta su criticidad, la disponibilidad de los vehículos y la tipología que lo atenderá

(Transportes asistencial de Mediana y Baja complejidad), a través de prestadores públicos y privados.

El funcionamiento de la atención de la línea de emergencias en la ciudad de Bogotá D.C funciona similar a cualquier Sistema de Emergencias Médicas, inicia con una llamada, dónde se solicita una información al llamante y dependiendo de unas preguntas trazadoras y un proceso de regulación médica, se determina la criticidad del incidente y si es necesario o no, el envío de un vehículo de emergencia para realizar la atención en el sitio. Posteriormente, se determina en conjunto con el médico regulador, si se requiere el traslado a una institución hospitalaria, contemplando factores como disponibilidad de los servicios y cercanía al incidente. El paciente es conducido al servicio de salud, retornando la ambulancia a su estado de disponibilidad para la atención de otros incidentes.

Aparte del funcionamiento habitual, los sistemas de emergencias médicas desempeñan un papel importante para dar respuesta a las emergencias como sucedió con la pandemia de la COVID-19, en la cual, se incrementó la demanda de los servicios y se tuvo que destinar una mayor cantidad de recursos para la atención. También, se vio afectada la disponibilidad del recurso humano, tecnológico y logístico para dar respuesta. Los sistemas de emergencias médicas se comportaron como el primer actor de respuesta de los servicios de salud y evidentemente fueron la primera línea de defensa en la atención de los pacientes afectados por la COVID-19 [2].

A pesar que se establecieron diferentes estrategias como los programas de tele consulta o atención domiciliaria que busca disminuir el consumo de los recursos de los sistemas de salud [3], el sistema de emergencias médicas recibió la tarea de soportar la atención de urgencias y emergencias donde la alta demanda influyó en la respuesta brindada y en todo su comportamiento en general.

En ciudades como Nueva York se pasó de tener 4000 llamadas diarias a 7000 llamadas interviniendo en la respuesta de los servicios de urgencia, lo cual aumentó el tiempo del operador para poder atender la llamada, impactó la atención de otras enfermedades no asociadas con COVID-19 e incrementó el tiempo de respuesta, entendido como el tiempo desde que ingresa la solicitud hasta que un vehículo de emergencia llega

¹ Información del estudio obtenida gracias a la aprobación de uso de las bases por parte de la Secretaría Distrital de Salud de la ciudad de Bogotá y la Dirección de Urgencias, Emergencias y Desastres. Jhohan A. Sánchez-Moreno es Ingeniero de Producción que labora en la Subdirección Centro Regulador de Urgencias y Emergencias - CRUE; Estudiante Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, pertenece al grupo de Investigación Laboratorio de automática e inteligencia computacional -LAMIC (correo electrónico: jhoasanchezm@correo.udistrital.edu.co).

² Juan Carlos Figueroa-García Ph.D es profesor asistente de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, pertenece al grupo de Investigación Laboratorio de automática e inteligencia computacional -LAMIC (Correo electrónico: jcfigueroag@udistrital.edu.co)

al sitio del incidente. [4]

De la misma manera, existen algunos comparativos respecto a la afectación de los sistemas de emergencias médicas en época de la pandemia de la COVID-19, para la región de Pensilvania, Estados Unidos se disminuyó en un 26,5 % las respuestas y aumentó en un 46,6 % los no transporte de pacientes en comparación con el año anterior [5]. Otras ciudades como Copenhague también aumentaron la frecuencia de las llamadas que ingresaron en el primer mes de la pandemia a sus dos líneas telefónicas, el número de emergencia 112 y la línea de ayuda médica 1813. La primera, aumentó un 4 % pasando de recibir 8.492 a 8.870 llamadas y la segunda, tuvo un aumento del 25,1 % pasando de 84.176 a 105.380 llamadas lo que representó, un aumento del tiempo para la atención de las solicitudes de ayuda médica, con un tiempo de cola en la línea de 2 minutos y 23 segundos durante el 2019 a 12 minutos y 2 segundos en la primera semana de la pandemia. [6]

El análisis comparativo permite identificar las características del sistema en diferentes momentos de estudio, cómo fue su comportamiento y atención para la situación de alta demanda generada por la COVID-19 y los factores que influyeron para generar información que fortalezca su funcionamiento.

II. PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.

La demanda de atención de los incidentes que se presentan en la ciudad y que son atendidos por medio de un proceso de regulación médica tiene relacionados una gran cantidad de factores y variables que se deben estudiar para conocer su comportamiento. A partir de esto, describir un proceso de la vida real necesariamente requiere tener en cuenta una gran cantidad de variables y analizarlas de forma simultánea [7]. El desconocimiento de estos factores claves dificulta establecer propuestas que impacten la atención de los pacientes y que fortalezcan el sistema para ser más resiliente a los cambios presentados en su entorno.

La pandemia generada por la COVID-19 que llega a Colombia a inicios del año 2020, presenta un gran reto para las autoridades sanitarias que deben establecer diferentes planes de acción con el fin de dar respuesta a los cambios generados y reducir la circulación del virus; para ello, incrementaron la capacidad hospitalaria y vincularon una gran cantidad de talento humano que soporta los procesos operativos, situaciones a las cuales el Sistema de Emergencias Médicas de Bogotá no fue ajeno.

Así mismo, se presenta un incremento significativo de la cantidad de llamadas realizadas por la comunidad pasando de recibir 38.141 incidentes en el mes de enero de 2020 a 124.485 en el mes de Marzo [8], asociadas a la pandemia. Esta situación se mantuvo durante la época comprendida entre marzo de 2020 a septiembre de 2021, triplicando incluso, el número de llamadas recibidas para ser gestionadas por el personal del centro operativo de la subdirección CRUE. [9]

Este comportamiento atípico género en el sistema una serie de retos para gestionar las solicitudes en salud que llegaban a través de la línea de emergencia, por lo cual la búsqueda de información clave que permita conocer elementos que faciliten

la respuesta en situaciones de alta demanda, aparece como un campo de estudio interesante y útil para la atención de urgencias, emergencias y desastres.

III. AVANCES PRELIMINARES DEL ESTUDIO.

En primer lugar, el desarrollo del estudio comparativo requiere determinar la población que, para este caso, son los incidentes de salud que ingresan por la línea de emergencia 123 y son atendidos por el centro operativo del CRUE, incluyendo tanto los incidentes que tienen el despacho de un vehículo de emergencia como los que se gestionan únicamente por llamada. Se evita fraccionar el análisis a una localidad o zona específica de la ciudad con el fin de identificar el comportamiento del sistema de la forma más cercana posible a la realidad, además que, sesgar el trabajo de investigación a una localidad, no permitiría identificar la incidencia de todas las variables.

Las bases de datos para el desarrollo del trabajo son obtenidas mediante el sistema de despacho que se tiene establecido para los periodos de estudio, es un sistema administrado por la Secretaría Distrital de Seguridad, Convivencia y Justicia, específicamente por el Centro de Comando, Control, Comunicaciones y Computo de Bogotá -C4, el cual recibe las llamadas de la línea de emergencia y dependiendo la solicitud de la ciudadanía, es direccionada a la agencia correspondiente, como puede ser Policía Metropolitana de Bogotá, Cuerpo Oficial Bomberos de Bogotá, o en el caso de este estudio al CRUE de la Secretaría Distrital de Salud.

Para los años 2018 y 2019, hasta el mes de noviembre, se cuenta con la plataforma tecnológica ProCAD y a partir de diciembre de 2019 y para los años 2020 y 2021 se cuenta con la plataforma Premier One, las cuales almacenan la información de la gestión del incidente, ya sea que su atención se realice por medio telefónico o con un vehículo de emergencia. Teniendo en cuenta que las bases contienen todos los incidentes que fueron transferidos al CRUE no se realizará un proceso de muestreo, sin embargo, la base si debe recibir una depuración con el fin de trabajar únicamente con los registros que presenten información completa.

Las bases fueron suministradas por el CRUE de la secretaria Distrital de Salud, cuentan para el año 2018 con 505.172 registros, para el año 2019 se tienen 516.611 registros, para el momento de pandemia, es decir los años de 2020 y 2021 se cuenta con 886.792 y 651.713 registros respectivamente.

III-A. Preparación de las variables de la base.

El primer paso que se desarrolló fue identificar cuáles variables eran pertinentes para el estudio en cuestión y podrían arrojar información importante, para ello se analizó el comportamiento en general del sistema y se identificó las variables que lo explicarán, eligiendo las presentadas en la tabla I.

Dentro de las variables seleccionadas se tiene el tipo de incidente, el cual, relacionada el tipo de solicitud que realizó la población, por ejemplo, atención de un accidente de tránsito, un herido, intoxicación, entre otros; el cual posterior a la regulación medica se le determina la prioridad final que actualmente está establecida con cuatro niveles, bajo, medio,

Tabla I
VARIABLES USADAS EN EL ESTUDIO

Tipo de incidente
Prioridad final
Tipo de la ambulancia
Fecha inicial del incidente
Hora del incidente
Fecha de la recepción en el CRUE
Hora de la recepción en el CRUE
Fecha 518.
Hora 518
Fecha 523
Hora 523
Fecha 518B
Hora 518B
Fecha 523B
Hora 523B
Fecha de cierre
Hora de cierre
Código de cierre
Incidente con despacho
Localidad
Coordenada x - Longitud
Coordenada y - Latitud

alta y crítica. Dependiendo de la tipificación de prioridad y la directriz del médico regulador se asigna un tipo de ambulancia que puede ser Transporte Asistencial de Baja Complejidad – TAB o Transporte Asistencial de Mediana Complejidad -TAM, adicionalmente en el año 2018 se contaba con vehículos de respuesta rápida -VRR y para el año 2020 con vehículos de atención médica domiciliaria.

En segundo lugar, se cuenta con todas las variables que indica las fechas y tiempos de llegada del incidente al C4 y cuando fue recibido por el CRUE, así como los principales tiempos cuando se asigna el vehículo de emergencia. El sistema tiene establecido el control del estado del vehículo mediante códigos como el 518 que indica el inicio del desplazamiento del vehículo de emergencia al sitio del incidente, el 523 que indica la llegada del vehículo de emergencia al sitio del incidente, si posteriormente a la valoración en la escena, se determina trasladar el paciente, se tendrían los tiempos 518B que indica el inicio del desplazamiento a la institución de salud donde se llevará el paciente y el 523B que indica la llegada a la institución. Finalmente se cuenta con la fecha y hora de cierre que se da cuando el vehículo de emergencia vuelve a quedar disponible y se ha realizado la gestión de la solicitud o cuando se ha brindado la información requerida para los incidentes que no ameritan despacho, en los dos casos se debe generar un código de cierre que indique el resultado final de la gestión.

Por último, se cuentan con las variables que indican si el incidente tuvo despacho o no de una ambulancia, en qué localidad se presente el incidente y las coordenadas x (longitud) e y (latitud) que indica la ubicación sobre el mapa de la ciudad.

Para el análisis de la información todas las variables deben estar en términos numéricos, por lo cual, se normalizan para que las variables de tipo categórico como código, tipo de ambulancia, localidad, entre otras, queden expresadas en forma numérica. Igualmente como se mencionó anteriormente no todos los incidentes son atendidos por medio de un vehículo

Tabla II
ERRORES ESTADOS VEHÍCULO DE EMERGENCIA

518 Dummy	523 Dummy	518B Dummy	523B Dummy
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
0	0	1	0

de emergencia o no se tienen todos los tiempos, por motivos asociados al no despachó del vehículo, se canceló antes de llegar al incidente o no se trasladó el paciente a un servicio de urgencias, razón por la cual se establecen variables dummy para cada uno de los tiempos de atención del vehículo, en las cuales se asigna el valor de 1 cuando se tiene el tiempo y el valor de 0 en caso contrario.

III-B. Ajuste al contenido de la base

Se contempló dentro de la depuración de las bases determinar que todo el contenido que se tiene permite realizar un análisis completo, por consiguiente, se revisa inicialmente qué variables presentaban algún tipo de información faltante. De esta manera se identificó que algunos registros no tenían los datos de las coordenadas x e y, así como las localidades, lo cual dificultaría realizar un análisis del comportamiento de los incidentes geolocalizados en la ciudad, perdiendo calidad en uno de los aspectos que más influye en los sistemas de atención como es la dispersión geográfica que pueda tener la demanda [10].

De la misma manera, otras variables que presentaron datos faltantes fueron las relacionadas con el tipo del incidente que se atendió, la prioridad asignada, el código y fecha de cierre; estos registros también se decidieron omitir para el análisis, dado que no permitían caracterizar completamente el incidente o la gestión realizada por el CRUE sobre el mismo.

Los tiempos de los desplazamientos del vehículo de emergencia también se contemplaron dentro del análisis de errores que podría presentar la base, algunas veces por la dinámica de la operación el personal no ingresa algunos tiempos de la atención, o su registro presenta incongruencias respecto a las horas establecidas, esto es por ejemplo los estados del vehículo de emergencia van en un orden específico (518, 523, 518B y 523B) no es posible que un estado tenga una hora inferior al del estado que lo antecede. Igualmente, los incidentes con asignación de vehículo de emergencia no siempre tienen todos los estados, por ejemplo, cuando el incidente se identifica en la vía no se cuenta con el estado 518 ya que nunca se inició como tal un desplazamiento al incidente, este tipo de registros si son coherentes y se mantienen para el análisis, aun así, las situaciones presentadas en la tabla II se comportan como errores que se deben omitir.

Posteriormente a tener la información completa se identificaron que algunos de los incidentes presentaban duplicados,

Tabla III
REGISTROS POR AÑO

Año	Cantidad inicial	Cantidad final	Porcentaje que se mantuvo
2018	505.172	478.586	94,7 %
2019	516.611	458.690	88,8 %
2020	886.792	650.825	73,4 %
2021	651.713	520.975	79,9 %

por consiguiente se revisaron para identificar cuales no representaban información de un incidente gestionado, para ello se entiende que un incidente cuando es atendido por más de un vehículo de emergencia se crean varios registros, es claro que cuando hay más de un paciente es necesario la asignación de varios vehículos, al igual que si en la escena un vehículo de tipo medicalizado se encarga de la valoración mientras los demás vehículos de baja complejidad van realizando los traslados, son situaciones que para el análisis se comportan como un registro valido que representa la gestión de diferentes actores dentro del incidente. Sin embargo, cuando se proponen más de un vehículo por la dinámica de operación y posteriormente se cancelan antes de llegar a la escena por situaciones relacionadas con que ya llego un vehículo y solo es un paciente, o no se requieren más vehículos en la escena o puede asignarse un vehículo y luego determinarse que es más rápida la atención por parte de otro vehículo, son situaciones que no representan una atención de un paciente razón por la cual se debe retirar para que la base no genere más incidentes de los que realmente se presentaron.

Bajo estas consideraciones se depuran la base de datos y se genera datos completos que representen una calidad significativa para el estudio y que pueden ser utilizados en los posteriores análisis, finalmente se trabajara con los registros presentados en la tabla III

III-C. Descriptivas iniciales en el estudio.

Con las bases depuradas se inicia los procesos de cálculo de medidas descriptivas para identificar los datos básicos que podrían arrojar cada uno de los años y algunos parámetros como la varianza, desviación estándar, la moda, media y mediana de cada una de las variables. También se desarrollan los análisis de correlación lineal por medio de la herramienta Phytion para poder identificar el nivel de correlación que existe entre las variables que se están estudiando, sin embargo, como se presentó, la idea de la investigación es avanzar en un estudio de análisis de datos multivariante razón por la cual se complementará esta información preliminar con los demás análisis posteriores.

IV. TRABAJO FUTURO DEL ESTUDIO

Con las bases de datos depuradas y las variables seleccionadas para desarrollar el estudio, se planea caracterizar los dos momentos de estudio por medio de diferentes herramientas de análisis de datos multivariantes que permitan obtener información de su comportamiento y atención, para ello es necesario resumir, condensar los datos y relacionar las variables con las que se cuenta para el estudio a través de proceso de exploración de datos multivariantes.[7].

Para clasificar los datos se hará uso de técnicas de agrupamiento (cluster methods en inglés) con el fin de identificar características comunes entre los diferentes individuos, que permita agruparlos y obtener información de cada uno de los grupos generados; este tipo de análisis son muy útiles para identificar datos que a simple vista no se puede caracterizar, por ejemplo en [11] se identifican dos grupos de comportamientos de salud para los adultos en Japón incluyendo variables de tipo demográfico para su agrupación, de esta manera se clasifico la población en moderadamente saludables y un segundo grupo como población con mala nutrición y con problemas de alcohol, donde la pertenecía a un grupo o el otro está determinado por su nivel de educación, tener o no una familia e incluso estar casadas para las mujeres.

Además, dado que los datos representan los incidentes de la ciudad de Bogotá, es un problema que tiene un componente geoespacial, como se puede ver en modo de ejemplo en la figura 1, se representa los incidentes de tipo respiratorio del mes de Mayo y Junio del año 2021, meses en los cuales se presentó una alta demanda asociada a la COVID-19, por lo tanto, realizar un análisis de datos incluyendo esta característica brindará más información al problema de estudio, indicando las zonas más afectadas y permitiendo ver el comportamiento de la atención en la ciudad por parte del Sistema de Emergencias Médicas. En la salud pública el manejo de análisis estadísticos geoespaciales es de gran utilidad y para la pandemia de la COVID-19 brinda grandes herramientas de análisis, en [12] se realiza un análisis espacial del avance y comportamiento de la pandemia en Bangladesh en donde se analiza para cada una de sus zonas cual fue su afectación, forma de propagarse y que factores influyeron para este comportamiento.

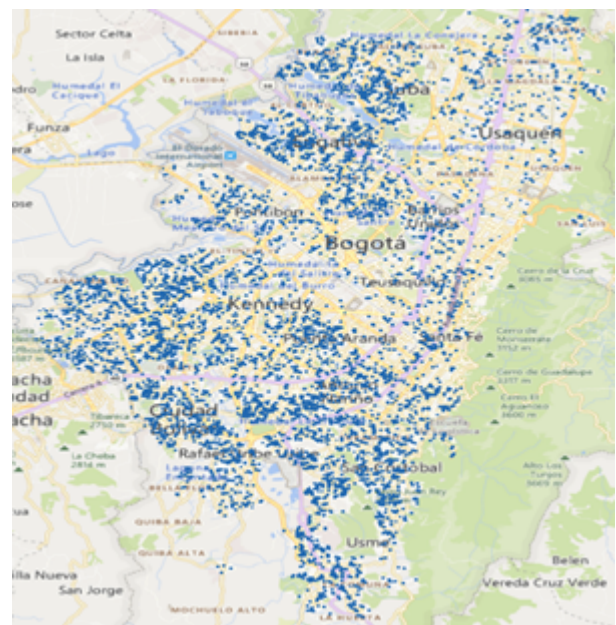


Figura 1. Incidentes de tipo respiratorio en la ciudad de Bogotá en los meses de Mayo y Junio de 2021.

De forma similar se realiza un análisis espacial del comportamiento de la COVID-19 en Francia, utilizando diferen-

tes indicadores como numero de hospitalizaciones, tasa de mortalidad y el aumento de esta tasa comparada con los años anteriores, por medio de los datos georreferenciados identifican las zonas más afectadas por la pandemia como lo son el noreste, norte y la región de Paris, así mismo se incluyen diferentes factores como la cobertura médica en las regiones, la densidad poblacional y el capital social en el comportamiento de la COVID-19, identificando que a menor densidad, mayor cobertura médica y más capital social la afectación es menor. [13].

El objeto del trabajo además de la información obtenida por medio de los análisis estadísticos multivariados y las técnicas de clasificación, es analizar el comportamiento geoespacial y los cambios en las diferentes zonas de la ciudad a través del tiempo, identificando características en la atención y comportamiento de los incidentes. Con esta información se generará conocimiento respecto al sistema, sus características y actuación en general para la atención de los incidentes de la ciudad en dos momentos, uno de comportamiento habitual y otro de alta demanda, además su caracterización será un punto de partida para el abordaje de futuros proyectos relacionados con los Sistemas de Emergencias Médicas -SEM.

V. MÉTODOS UTILIZADOS Y RESULTADO PRELIMINAR

Como se mencionó en el trabajo futuro la caracterización se realizará utilizando técnicas de agrupamiento unido a un componente geoespacial. El desarrollo de los clústeres permite que los elementos se agrupen partiendo de alguna característica en común, con esto se puedan identificar rasgos y elementos en el comportamiento del sistema de atención prehospitalaria y del comportamiento de los incidentes que no sean fácilmente detectables. De esta manera la caracterización prevista para el sistema con una demanda habitual y un momento de alta demanda por medio de técnicas de clúster permitirá arrojar información adicional a la que se pudiera obtener por medio de variables individuales y con el componente geoespacial se logra una representación visual sobre en qué aspecto(s) trabajar cuando el sistema llegue a una alta demanda.

Se desarrollaron clústeres bajo la técnica de K-Means siendo la más común de este tipo de métodos para agrupar, sin embargo, permite realizar un acercamiento inicial a las posibles clasificaciones y por ende análisis de la información. Las bases se clasifican teniendo en cuenta los estados presentes en los vehículos de emergencia, inicialmente se toma para el año 2018 los incidentes atendidos únicamente por llamada, sobre los cuales adicionalmente se realiza un comparativo por momento del día (periodo diurno y nocturno). Se logra identificar que una de las agrupaciones que realiza el clúster es por la prioridad de los incidentes acompañado por la localidad donde se presenta el incidente, en la figura 2 y 3 se pueden evidenciar los resultados que fueron llevados al mapa de la ciudad con el fin de realizar el análisis geoespacial

Para el mismo clúster, pero realizado en la noche se evidencia un cambio en la pertenencia de algunas localidades en especial las de la zona norte como puede Suba, Engativá y parte de Usaquén.

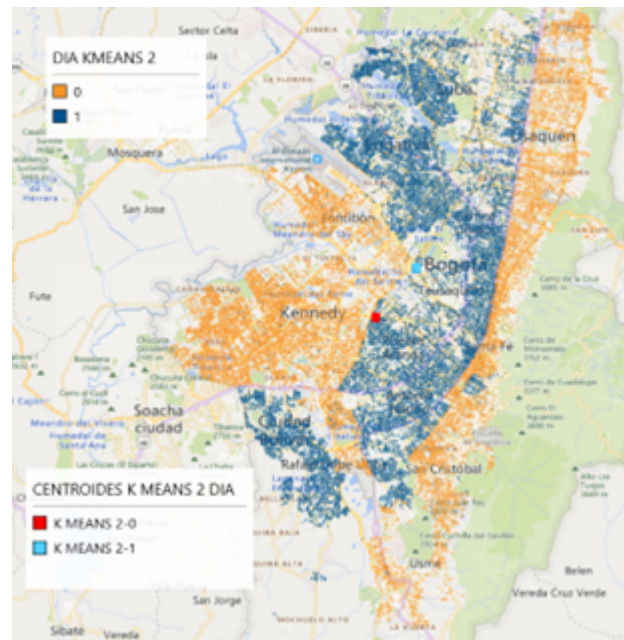


Figura 2. Clústeres día de incidentes atendidos por llamada para el año 2018.

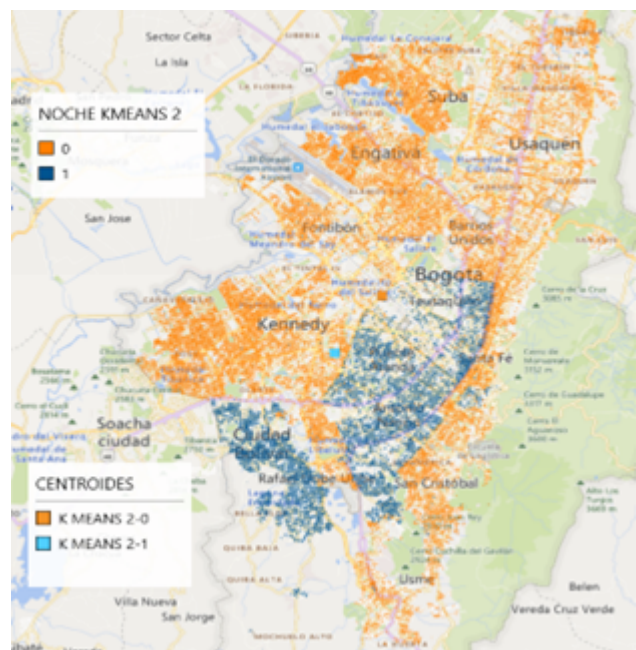


Figura 3. Clústeres noche de incidentes atendidos por llamada para el año 2018.

Con el agrupamiento del momento diurno del día se concentra el 50 % aproximadamente en cada uno de los clústeres, sin embargo, en la noche la agrupación para el clúster 0 es del 76 %, evidentemente al concentrar un mayor número de localidades aumenta su participación. La diferencia puede estar concentrada por el flujo de personas a lo largo del día y como se concentran la población para el desarrollo de sus labores o los lugares donde habitan. Ejercicios similares se realizaron para el estado 518 donde no se encontró diferencia al menos en el agrupamiento por localidades entre el día y la noche.

También se desarrolló un análisis comparativo únicamente

para el tipo de incidente “Accidente de tránsito” para ver su diferencia en los dos momentos de estudio, se identifica una agrupación para los dos momentos exactamente igual, por lo cual el comportamiento en términos generales es similar o la técnica no permite determinar diferencias.

Adicionalmente los factores que se están incluyendo en los agrupamientos no son claros, por lo cual una clasificación concentrada principalmente en la localidad no se considera completamente explicativa para el comportamiento del sistema. Otro aspecto que llama la atención es que al utilizar las bases de datos normalizadas su distribución a través de la ciudad es completamente uniforme en donde no es posible segmentar cada uno de los clústeres, por lo cual se decide utilizar otras técnicas que permitan perfilar un poco más las características de los dos momentos de estudio y arrojar información más precisa para realizar los comparativos respectivos del sistema de atención de urgencias y emergencias de la ciudad de Bogotá.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría Distrital de Salud, «Salud capital,» [En línea]. Available: http://www.saludcapital.gov.co/DCRUE/Paginas/Informacion_Crue.aspx. [Último acceso: 29 Junio 2022].
- [2] F. Mohammadi, B. Tehranineshat y A. A. Khaleghi, «Management of COVID-19-related challenges faced by EMS personnel: a qualitative study,» *BMC Emergency Medicine*, vol. 21, pp. 1-9, 2021, doi: 10.1186/s12873-021-00489-1
- [3] J. R. Martínez Riera y E. Gras Nieto, «Atención domiciliaria y COVID-19. Antes, durante y después del estado de alarma,» *Enfermería Clínica*, vol. 31, pp. 24-28, 2020, doi: 10.1016/j.enfcli.2020.05.003
- [4] A. Al Amiry y B. Maguire, «Emergency Medical Services (EMS) Calls During,» *DovePress*, vol. 2021:13, pp. 407-414, 2021, doi: 10.2147/OAEM.S324568
- [5] T. Satty, S. Ramgopal, J. Elmer, V. Mosesso y C. Marin-Gill, «EMS responses and non-transports during the COVID-19 pandemic,» *The American Journal Of Emergency Medicine*, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.ajem.2020.12.078
- [6] T. Jensen, M. Geldermann Holgersen, M. Seit Jespersen, S. N. Blomberg, F. Folke, F. Lippert y H. Chistensen, «Strategies to Handle Increased Demand in the COVID-19 Crisis: A Coronavirus EMS Support Track and a Web-Based Self-Triage System,» *Prehospital Emergency Care*, vol. 25, pp. 28-38, 2020, doi: 10.1080/10903127.2020.1817212
- [7] D. Peña, *Análisis de datos multivariantes*, España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L, 2002.
- [8] Secretaría Distrital de Salud, «SaludCapital,» Octubre 2020. [En línea] Available: http://www.saludcapital.gov.co/Rendicin%20de%20Cuentas/Rendicion_cuentas_2020/Informe_RdC_SDS_2020.pdf.
- [9] Secretaría Distrital de Salud, «Saludcapital,» Octubre 2021. [En línea] Available: http://www.saludcapital.gov.co/RendicinInformes_gestion/Informe_RdC_SDS.pdf.
- [10] C. Castañeda Pérez, *Esquema de optimización / simulación para la evaluación multiobjetivo de sistemas de emergencia*, Trabajo de Maestría, Universidad de Antioquia, Colombia, 2016.
- [11] M. Satoh, «Clustering of health behaviours and association with socio-demographic factors among adults in Japan,» *European Journal of Public Health*, vol. 31, 2021, doi: 10.1093/eurpub/ckab165.370
- [12] R. Rahman, N. Islam y H. Islam, «Geospatial modelling on the spread and dynamics of 154 day outbreak of the novel coronavirus (COVID-19) pandemic in Bangladesh towards vulnerability zoning and management approaches. Model,» *Earth Syst. Environ.*, vol. 7, p. 2059–2087, 2021, doi: 10.1007/s40808-020-00962-z
- [13] M. Amdaoud, G. Arcuri, y N. Levratto, «Healthcare system and social trust in the fight against COVID-19: the case of France,» *European Journal of Public Health*, vol. 31, n.o 4, pp. 895-900, jun. 2021, doi: 10.1093/eurpub/ckab112.

Análisis de imágenes satelitales Sentinel-2 de la región de Aysén en Chile: Proceso de clasificación y sistema en prospectiva

J. Ceballos Varela and L.E. Cardona Meza
jceballosv@unal.edu.co, luz.cardona@uaysen.cl

I. INTRODUCTION

AYSÉN es una región de Chile ubicada en la Patagonia sudamericana con aproximadamente 107.000 habitantes y tiene una superficie de 108.494 km² [2]. Su geografía está compuesta principalmente por áreas boscosas con montañas, glaciares y superficies lacustres, que da lugar a un clima frío de bajas temperaturas con lluvias y humedad.

Con estas condiciones climáticas, características topográficas y la extensión de terreno de la región se generan incapacidades a la hora de tomar decisiones debido a su magnitud, pues, por ejemplo, la generación de economía agrícola, regulación de terrenos y el manejo de superficies boscosas representa limitaciones al momento de tomar decisiones para cualquier región, como se presenta en [5] donde al analizar regiones de Tailandia y Vietnam se compararon factores que afectan la toma de decisiones de agricultores para el uso que le dan a la tierra, con lo que encontraron que, principalmente, la toma de decisiones se ven representadas por las expectativas de los cambios climáticos y las condiciones físico-económicas de donde residen.

En noviembre de 2016 hasta diciembre de 2018, la Fundación Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile desarrolló un proyecto en la región de Aysén que tenía como objetivo principal “contribuir a incrementar la productividad, calidad y comercialización de los productos hortícolas de la Región de Aysén” [2], donde detallaron que la región de Aysén tiene muy poco desarrollo en horticultura y se ve limitada por condiciones climáticas. Dentro del proyecto se realizó capacitación a agricultores respecto a sembrado, tratamiento y comercialización, con lo que se probaron diferentes cultivos en invernaderos para validar qué producir. Aunque se obtuvieron resultados positivos con el proyecto realizado en invernaderos, se evidencia que obtener más información acerca de las condiciones de las superficies terrestres podría ayudar a expandir la aplicación de agricultura en la región y que se realicen pruebas con diferentes siembras para promover la diversificación de cultivos como se sugiere en [4].

La información de las superficies terrestres o acuáticas la necesitan incluso gobernantes políticos para la toma de decisiones o comparar alternativas, así como lo asegura [7], donde muestra cambios en los suelos desde un par de siglos pasados y cómo estos cambios crean una necesidad de conocer y estudiar las superficies terrestres por parte de agricultores,

administradores de tierras (organizaciones gubernamentales y no gubernamentales), dueños de terrenos, ingenieros, entre otros, por lo que su estudio termina en un llamado a la acción con elementos que hoy en día están en auge en temas de investigación respecto al reconocimiento de superficies terrestres, por lo que desarrollar procedimientos sistemáticos para la recolección e interpretación de información resulta siendo algo clave.

Con la gran cantidad de soluciones tecnológicas que surgen día a día para cualquier ámbito, y volviendo a tomar la agricultura como ejemplo, se encuentra que la agricultura no es una excepción a tareas independientes de la tecnología como se presenta en [1], por lo que se puede introducir un concepto que se maneja con la toma de decisiones en la agricultura llamado Agricultura de Precisión (PA), basado en detectar, observar y responder con acciones de gestión a la variabilidad espaciotemporal en los cultivos de acuerdo a ciertas características analizadas con dispositivos electrónicos (internet de las cosas) o detecciones con satélites [6]. Dentro de estas técnicas, el uso de satélites resalta al no tener costo, pues se encuentran más de 200 satélites en órbita que permiten acceder a señales y obtener información que no es exclusivamente para agricultura, pues se presta para realizar un análisis de una superficie terrestre. Además, dentro de los futuros requisitos en estudios y aplicaciones del PA, en el texto de [1] se planteó que el Big Data es un reto debido a que la información a analizar y los modelos que se implementen para analizarla, necesitarán ser los más nuevos y avanzados por el hecho de que la información estará actualizándose continuamente al estar alojada en la nube de internet, lo cual, para este año 2021, es algo que se puede aprovechar.

Dentro de la familia sentinel se pueden encontrar diferentes misiones, las cuales transportan las tecnologías más avanzadas para la observación de la Tierra, como los instrumentos radar o multiespectrales que permitirán monitorizar cualquier cambio en el terreno, en los océanos o en la atmósfera. En estas misiones se encuentra **Sentinel-2**, misión a utilizar en el presente estudio, esta misión multiespectral de alta resolución en órbita polar, está diseñada para monitorizar la superficie de la tierra estudiando la cubierta vegetal, los usos del terreno y de las aguas, los cauces navegables y las zonas costeras.

Teniendo en cuenta estos insumos y las ideas propuestas por autores, se puede evidenciar que el caso de las limitaciones que se presentan en la región de Aysén puede mejorarse, por lo que se quiere plantear un modelo de análisis de imágenes

satelitales de la región de Aysén. Una herramienta que permita analizar y visualizar posibilidades de las extensiones de terreno, teniendo en cuenta perspectivas sociales, económicas o de bienestar, puede facilitar la toma de decisiones por parte de emprendedores, organizaciones gubernamentales o no gubernamentales. De igual forma, este trabajo puede ser utilizado para cualquier área en donde se requiera realizar análisis específicos y tomar decisiones con mayor nivel de precisión.

II. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General:

Desarrollar un sistema en prospectiva para la predicción a corto plazo de variables cuantificables de la superficie terrestre con la adquisición y procesamiento de imágenes satelitales de la región de Aysén en Chile.

Objetivos Específicos:

- 1) Obtener imágenes de la región de Aysén en Chile a través del satélite Sentinel-2.
- 2) Procesar imágenes satelitales con la obtención de variables cuantitativas respecto a superficies boscosas, acuíferas y cultivos.
- 3) Implementación de un sistema en prospectiva con predicción a corto plazo con un modelo matemático basado en la información de las imágenes procesadas.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto está dividido en cuatro etapas que consisten en la obtención de imágenes satelitales, el procesamiento de las imágenes, implementación del sistema en prospectiva y, la que se va desarrollando en paralelo, la visualización de los resultados acompañada del informe donde se explique todo lo investigado y desarrollado.

Así como se ha mencionado se decide utilizar imágenes del satélite Sentinel-2, una misión de la Agencia Espacial Europea que tiene como objetivos dar continuidad de los datos y mejorar otras misiones de la agencia [9]. Para el cumplimiento de los objetivos específicos, se iniciará obteniendo estas imágenes desde del repositorio donde se encuentran alojadas para, a continuación, implementar el procesamiento de imágenes con el lenguaje de programación Python en Google Colab y aprovechar la API Sentinel Hub, que ayudará a tratar las imágenes y los datos respectivos. Tras lo anterior, se procede a realizar las pruebas de dos métodos de procesamiento de imágenes con cálculos matemáticos y la implementación de algoritmos de clasificación, según las técnicas que se encuentren en el estado del arte como lo presentan [3], Fig. 2 o [8] que utilizan técnicas de procesamiento definidas por otros autores e incluso proponen nuevas técnicas. Como resultado de esta revisión, se realizan representaciones de los píxeles de las imágenes, de donde se deducen valores de índices aproximados, como pueden ser la humedad, cobertura de superficies boscosas, acuíferas, cultivos, entre otras, logrando una estructura geográfica del área de estudio, con el desarrollo de un sistema semi-automatizado donde se apliquen todas estas técnicas del procesamiento de las imágenes.

Tras esto se realiza modelamiento de un pronóstico a corto plazo con un conjunto de datos pre- procesado de una zona en específico en diferentes instantes de tiempo.

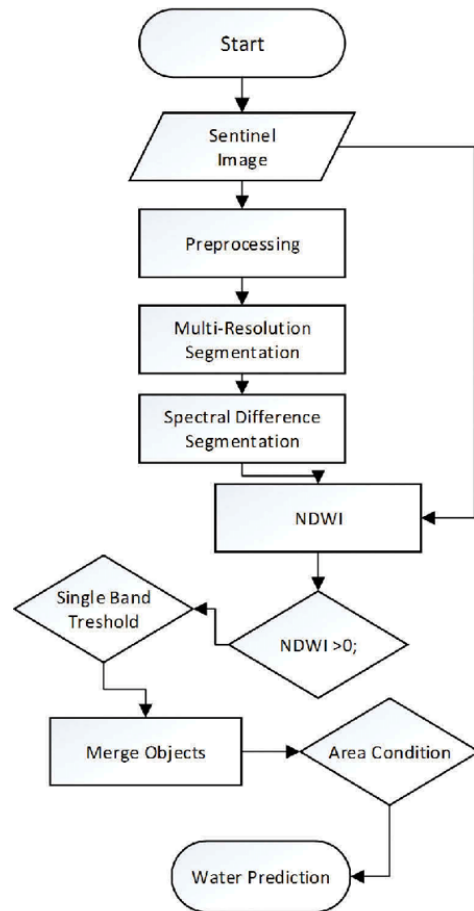


Fig. 1. Flujograma de la metodología.

IV. DESARROLLO

Para definir el área de interés se utilizó el software QGIS (QGIS Development Team, 2022) para dibujar el polígono de la región de Aysén y extraer el archivo a formato JSON que sirve para ser procesado por Sentinel Hub y delimitar las imágenes satelitales y el área que se quiere estudiar. Todos los procedimientos con Sentinel Hub fueron realizados en un cuaderno de Google Colab en lenguaje Python, donde se puede evidenciar la implementación de procesos y resultados obtenidos que se presentan en esta sección, Fig. 1

Con Sentinel Hub se procede a realizar una división del área de interés para ver en cuántas imágenes Sentinel-2 está dividida el área, lo que podría dar una dimensión de lo que será necesario procesar teniendo en cuenta que una imagen satelital abarca 290 km de ancho.

V. PRINCIPALES RESULTADOS

Los principales resultados de este trabajo fueron los de realizar un análisis a la región de Aysén por medio de imágenes satelitales teniendo en cuenta diferentes temporalidades desde años anteriores hasta la actualidad.



Fig. 2. Flujograma de la metodología.

De manera detallada se muestran resultados en relación con:

- Despliegue de las imágenes al procesar los valores de cada pixel para obtener finalmente la imagen que muestra el procedo realizado a las bandas enviadas como parámetros.
- Clasificación basada en píxeles y análisis de índices definidos por la Agencia Espacial Europea, para distinguir superficies terrestres por medio de las bandas espectrales (Normalised Difference Snow Index NDSI, Normalised Difference Moisture Index NDMI, Normalised Difference Vegetation Index NDVI, Normalised Difference Water Index NDWI, Barren Soil Index BSI).
- Tras la implementación del modelo, se obtuvieron pronósticos para el próximo mes para cada uno de los índices, donde se evidencia que cada pronóstico respeta la tendencia de los datos, por lo cual puede significar una estimación aceptable.

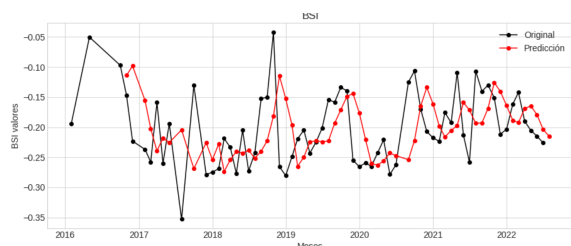


Fig. 3. Pronóstico promedio simple para BSI

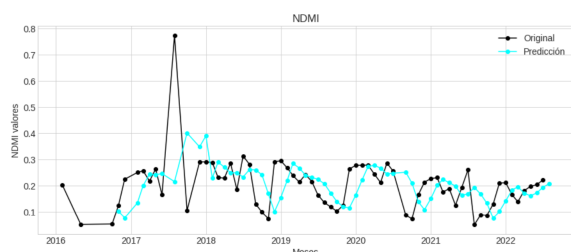


Fig. 4. Pronóstico promedio simple para NDMI

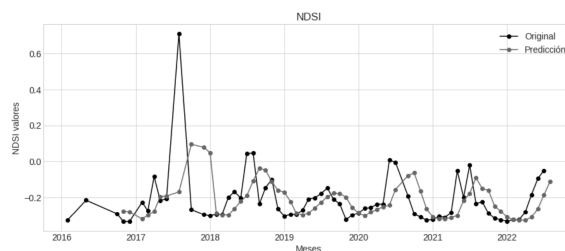


Fig. 5. Pronóstico promedio simple para NDSI

VI. PRINCIPALES CONCLUSIONES

Respecto a la región Aysén y los resultados obtenidos con las imágenes, principalmente en la clasificación de píxeles, se obtienen resultados esperados logrando una visualización de la superficie terrestre y la clasificación de la tierra. Se pudo evidenciar en una de las imágenes la descripción territorial general de Aysén, por lo que también se logran obtener resultados esperados por ese aspecto. Podemos evidenciar que los diferentes índices espectrales que se utilizaron para analizar las imágenes logran dar un punto de partida para ampliar el análisis de cualquier zona del mundo, siempre y cuando la cobertura de nubes lo permita.

Este tipo de trabajos puede propiciar la generación de un repositorio permanente de datos para ser utilizados en análisis prospectivos que den indicaciones de los cambios en el territorio, generar políticas públicas sobre preservación de los ecosistemas ambientales y prever deterioros o cambios adversos en el territorio.

REFERENCIAS

- [1] Auernhammer, H., & Demmel, M. (2015). "State of the Art and Future Requirements." en *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. CRC Press.
- [2] Chile, F. F. de C. A. de la U. de. (2016). "Desarrollo hortícola en la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo." <http://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/147176>
- [3] Kaplan, G., & Avdan, U. (2017). "MAPPING AND MONITORING WETLANDS USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGERY."
- [4] Nguyen, C., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L.-Z. (2021). "A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. Land, 10, 1–18." <https://doi.org/10.3390/land10030231>
- [5] Nguyen, T. T., Nguyen, L. D., Lippe, R. S., & Grote, U. (2017). "Determinants of Farmers Land Use Decision-Making: Comparative Evidence From Thailand and Vietnam." *World Development*, 89, 199–213. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.08.010>
- [6] Stone, M. L., & Raun, W. R. (2015). "Sensing Technology for Precision Crop Farming." en *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*. CRC Press.
- [7] Tugel, A. J., Herrick, J. E., Brown, J. R., Mausbach, M. J., Puckett, W., & Hipple, K. (2005). "Soil Change, Soil Survey, and Natural Resources Decision Making: A Blueprint for Action." *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 738–747. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0163>
- [8] Wang, Q., Shi, W., Li, Z., & Atkinson, P. M. (2016). "Fusion of Sentinel-2 images." *Remote Sensing of Environment*, 187, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.030>
- [9] Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W.-H., Liu, H., & Liu, G. (2017). "Band selection in sentinel-2 satellite for agriculture applications." *23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8081990>

Real-Time Energy Management System Supported on Cloud Services for Cluster of Microgrids

David Rosero-Bernal ¹, Enrique Sanabria-Torres ¹, Student, IEEE, Fabio Andrade-Rengifo ¹, Member, IEEE, Nelson Díaz-Aldana ¹ and César Trujillo-Rodríguez ¹

(dgroserob, nldiaza, cltrujillo@udistrital.edu.co, enrique.sanabria@upr.edu, fabio.andrade@upr.edu)

Abstract—An innovative microgrid’s energy management system demands many features under a hierarchical structure perspective: an autonomous and scalable design, massive storage capabilities, real-time information analysis, and fast-paced processing are a few, and others such as cybersecurity issues to maintain trustworthiness and viability, are a must. This research revised most of them before integrating and deploying the proposed cloud-based real-time energy management system architecture in a real-life scenario. The implementation solved an economic dispatch problem, incorporated internet of things materials, and used suitable machine learning functionalities in an interconnected microgrid assemblage. For this, the authors studied and ran microgrid models, deployed the models into hardware-in-the-loop units, linked the consolidated hardware to a production cloud server, and merged the energy management system with machine learning, and the internet of things tools. As established by real-life evidence, this research defines relevant aspects for a fully deployed scalable and autonomous real-time cloud-computing energy management system architecture to optimize energy generation, usage forecasting, and energy trade.

Index Terms—Real-Time, Microgrid Cluster, Testbed, Energy Management System, Machine learning, Big Data.

I. INTRODUCTION

THE environmental policies that encourage the development of renewable energy sources (RESs) [1] and battery energy storage systems (BESS) [2] price reduction has extended the microgrid (MG), the microgrid cluster (MGC), and energy management system (EMS) concepts. These technologies could conveniently handle these policies to facilitate certain features like generation, load management, and self-sustaining functionality and, under certain circumstances, promote the development of unique and opportunely classes of regional energy trading. Under this approach, methodical and cost-effective MGC management [3] needs to consider planning, designing, and operational demands [4]. This research includes these considerations for testing the cloud-based real-time EMS (CREMS) architecture defined in [5] using the

testbed described in [6]. Unlike [7], this research runs in real-time and integrates generation and consumption forecasting under a cost-effective procedure using cloud computing (CC) services, in particular, big data (BD) resources [8]. It was interesting to test the CREMS in a real-life testbed to validate the ML, and BD applicability in an MGC EMS, as there were variances between the postulate results and the practical validation.

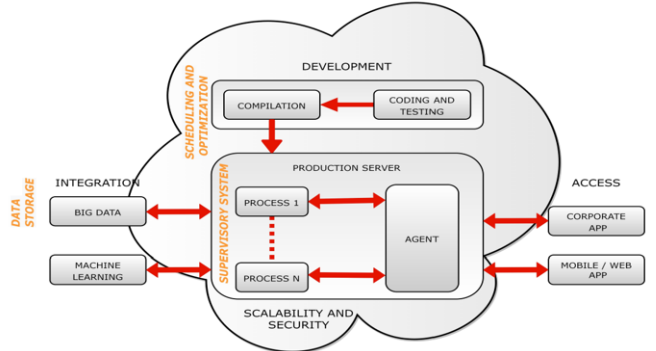


Fig. 1. Proposed cloud-base real-time architecture.

As noted in [5], the CREMS has three sections (Fig. 1): supervisory system (SS), data storage (DS), and scheduling and optimization (S&O). In this research, the SS section uses a cloud-deployed Matlab Production Server (MPS) [9], where the broker links each MG with a procedure and the CREMS assumes a managerial stance. The information gathered by the SS is uploaded into the DS using Big Data (BD) mechanisms available in the Amazon Web Services (S3) [10]. The DS section is a measurement file collection that provides the pattern and predictive framework that data need to execute unique duties. Lastly, the S&O section performs the codes and frameworks to get optimal references for the RES employed by the testbed. Fig. 6 illustrates an overall scheme of system deployed in the testbed available in the Sustainable Energy Center (SEC) of the University of Puerto Rico at Mayaguez [6], [11]. For this experiment, the MGC integrated three (03) Inverter-based Distributed Generators (IDGs) coupled to a BESS to simulate a dispatchable unit. In this case, three IDG denoted two photovoltaic systems and one wind turbine. This experimentation presumed that each MG chose to contribute to augmenting the assemblage’s total profit. Also, this experiment secured the design’s accuracy and power

¹ Partial results of the research project “Análisis y diseño de un sistema de generación eólica para operar en microrredes eléctricas de baja potencia”, registered in the CIDC, were included in this article. This endeavor was financed by Minciencias [grant number 80740-542-2020] and Dynamic Defense Solutions SAS. (Corresponding author: David Rosero-Bernal) Rosero-Bernal, N. Díaz-Aldana, and C. Trujillo-Rodríguez are with Doctorado en Ingeniería, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá D.C., Colombia (dgroserob@udistrital.edu.co; nldiaza@udistrital.edu.co; cltrujillo@udistrital.edu.co) E. Sanabria-Torres and F. Andrade-Rengifo are with University of Puerto Rico, Mayagüez, PR (enrique.sanabria@upr.edu; fabio.andrade@upr.edu)

production by incorporating the utility grid in the model through a four-quadrant power amplifier [12]. This feature permitted the cluster to consider an adequate reference for the frequency and voltage and facilitated balancing the energy demand and the energy generated when the load or the generation varies. To our understanding, supported by a detailed biography revision, only a few experiments related uses a real-life hardware-in-the-loop testbed to validate their proposal, but so far, no one has validated the CREMS impact on the MGC management when including ML and BD resources. Table I briefly summarizes related cloud-based real-time research. The table details the investigation framework, publication year, methods or techniques used, advantages, and limitations. The mentioned limitations are used as a starting point in this work.

The paper procures this assembling: Section II outlines the CREMS architecture. Next, in section III, the manuscript exposes this case study execution. Later, section IV analyzes this case study performance assessment. And lastly, section V completes this experiment.

II. THE CREMS ARCHITECTURE

The proposals outlined in [13] and included in Table II indicate CC risen operation into the MG's EMS. Nevertheless, those experiments did not deepen on establishing a CREMS framework that could relate to an MGC. The bibliography review indicates that this issue has been less analyzed and experimented in a real-life hardware-in-the-loop testbed. This issue motivated this experiment. The architecture presented in Fig. 1 sustains its implementation on cloud services, in particular, Amazon Elastic Compute Cloud (EC2) [14] but could consider others like Google Cloud and Microsoft Azure, among others. The architecture has adapted the MPS structure [9], considering the MGC management requirements, to effectively use advanced management procedures at the hierarchical structure's strategic level to maintain the MGC's secure process covering various functionality scenarios [15] - the top decision layers specify the assignments and regulate lower layers without ignoring their decisions. The architecture's particular integration enables the definition and adhesion of a multi-cloud-supported framework that allows scalable CREMS characterization for an MGC control. Likewise, an active algorithm gives sufficient constancy and excellent energy reference update under unforeseen changes in generation and consumption. As stated in [9], the architecture design allows the S&O section to update, create, compile, and deploy the CREMS algorithm to the server unaltering its functioning. Similarly, it facilitates the DS section accessing the mechanisms that the CREMS demands to incorporate BD and ML routines to enhance the MGC management execution. Lastly, the SS unit cross-platform accessibility enhances the framework's capabilities to obtain low latency processing, expansion capability, and redundancy required by the CREMS.

The suggested CREMS considered a mixed-integer linear programming (MILP) problem, as defined in [7], and employed it to decrease the expenditure applicable to the utility grid employment [3], [28]. The scheduling executes T hours with timeframes of 30 minutes. The letter t represents the T th

hour (where $t = 1, 2, 3, \dots, T$), and i represents the i th IDG (where $i = 1, 2, 3$). Table II summarizes the MGT parameters setup used in this trial, and the CREMS's output variables were the setpoints for each IDG, for this case, $P_{pv}(1, t)$, $P_{pv}(2, t)$ and $P_{wt}(1, t)$.

Conveniently, the CREMS expands progressively according to the number of MGs available in the cluster [5], namely, $\forall i \in I$ and $\forall t \in T$:

$$\begin{aligned} \min_{p(1,t), \dots, p(i,t)} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} C_{i,t} p_{i,t}^{\text{forecast}} + C_t p_{\text{Grid}, t} \\ \text{subject to} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} p_{i,t}^{\text{forecast}} + p_{\text{Grid}, t} \leq p_{d,t}^{\text{forecast}} \end{aligned} \quad (1)$$

Where, $p_{d,t}$ describes the MGC's full power requirement at time t , $p_{i,t}$ regards the power produced by the i th DG at the t time, the IDG set restricts to $i = \{1, 2, 3\}$, the scheduling time considers $t = 1, \dots, T$, $C_{i,t}(p_{i,t}^{\text{forecast}})$ defines the cost function for the i th DG at time t and $C_t(p_{\text{Grid}, t})$ describe the cost function for the utility at the same time. Considering [7], [29], this research regards the following constraints: Generation limits, Cluster output balance corresponding to the estimated production, the battery availability, and the public system, Batteries' condition in both charging and discharging state, Batteries' restrains to specific boundaries, Batteries' SOC tracking, Batteries' SOC limits, Batteries' charging state coming from the renewable units, Batteries' charging state coming from the utility, Batteries' discharging state into the utility.

III. CASE STUDY IMPLEMENTATION

This section explains the SEC's MGT adaptation to emulate an MGC with three IDGs associated with a BESS functioning as a dispatchable unit. Based on [6], the self-trained CREMS performs duties linked to the MGC functionality like customer utilization, resource assignment prognostication, optimization procedures, energy estimation, and centralized learning within a user-defined time resolution. This experiment operated with a half-hour time resolution and close to real-time information to accommodate the IDG's setpoints leading to a fully deployed CREMS. The CREMS implementation considered three main aspects: controlling the battery's SOC, exploiting historical data for renewable and load energy, and reducing the utility costs. The MGT employed a dSPACE SCALEXIO [31] system working as a hardware-in-the-loop interface (HIL) that controlled the testbed inverter-based generators. It also incorporated an OPAL-RT OP1400, a four-quadrant power amplifier [12] used as a hardware-power-in-the-loop (PHIL) that emulates: utility grid, program failures, power quality cases, and linear and non-linear loads. All the applications were programmed with Matlab-Simulink through the real-time interface (RTI) and were associated and executed in the dSPACE ControlDesk Virtual Control Panel app. By default, the MGT includes four 2.2 kW three-phase DAN-FOSS VLT-302s that symbolize each IDG. However, each generator voltage input configuration is independent, and the testbed could resemble different renewable energy resources - two photovoltaic and one wind turbine in this case - each

TABLE I
MGT CONFIGURATION PARAMETERS

Parameter	Grid	PV1	Bpv1	PV2	Bpv2	WT	Bwt
Selling Cost, \$/kWh	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Operative Charge, \$/kWh	0.21	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.05
Production (Min.), kW	-0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Production (Max.), kW	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Initial SoC, %	-	-	100	-	100	-	100
Minimum SoC, %	-	-	20	-	20	-	20
Maximum SoC, %	-	-	100	-	100	-	100
Storage Capacity, kW	-	-	0.50	-	0.50	-	0.50
Battery Efficiency, %	-	-	0.93	-	0.93	-	0.93

IDG emulated a small residential microgrid. The three-phase LCL modular filters are connected to each inverter output to reduce harmonic components. Also, each inverter isolates from the AC bus using a three-phase solid-state relay. A PLC controlled the three-phase solid-state relay to connect it at the desired time interval, one minute for this exercise. Also, the AC bus could pair to the utility grid for emulating grid-connected or island conditions. In this pilot, the four-quadrant power amplifier worked as the utility grid to set the operative frequency, provide voltage coupling, and balance the consumption demand. Likewise, the MGT modular structure allowed connecting or disconnecting real-loads to the AC bus to test any load-sharing control strategy. The MGT uses LEM sensor boxes to measure the three-Phase LCL modular filters for analog measurement.

IV. CASE STUDY IMPLEMENTATION

The main contribution of this work is to test a CREMS following the framework defined in [5]. Unlike previous approaches in this experiment, the system optimization algorithm executes in an MPS instance using CC. This approach improves the CREMS performance by eliminating the offline optimization process [32]. The CC usage improves the findings presented in [7] as the CREMS relieves the utility costs and optimizes the battery usage - following the configuration parameters defined in table II. As the system can manipulate energy decisions near to real-time, the EMS structure adapts conveniently to the amount of MG available at a specific time. Also, the energy production prediction provides an initial assessment to the energy administrator and the final user. In this case, the CREMS performance considered a summer week with a moderate PV and WT generation and the batteries' SOC initial state set to 100%. Fig. 2 exhibits the power scheduling for the MGC. The three lines present the demanded, dispatch, and utility grid energy in red, black, and purple, respectively. As proposed, the CREMS optimizes both the energy delivered by each RES and the one supplied by the utility grid to cover the load. Likewise, the utility grid, emulated in this experiment by the power amplifier, balances the energy demand with the generation in specific simulation periods - days 2, 3, and, 7. Fig. 3 displays the load-generation balance impact over the cost assumed by the MGC final users in these specific spots. As stated in table II, the utility grid and RES usage consider operating fees. The market operator defines the utility cost, and maintenance, replacement, and lifespan determine the long-term RES expense. Then, Fig. 4 shows

the number-one PV-system performance during the week. It includes power available, delivered, and charging state. The ML model specifies the dispatched power according to the forecasted power availability. Likewise, within the timeframe considered, the batteries' SOC exhibits favorable results as its percentages stay regulated to the restrained percentages reducing high discharge repercussions, expanding batteries lifespan, and reducing utility grid usage in the charging process - most of the charging power comes from RES. Fig. 5 exhibits this, and Fig. 3b corroborates this statement. A similar analysis, not shown here, applies to the second PV and the wind turbine systems. Be aware that the power units and dollars express in thousands

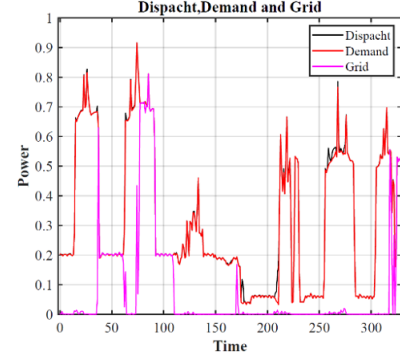


Fig. 2. Scheduling- Dispatch, Demand and Grid

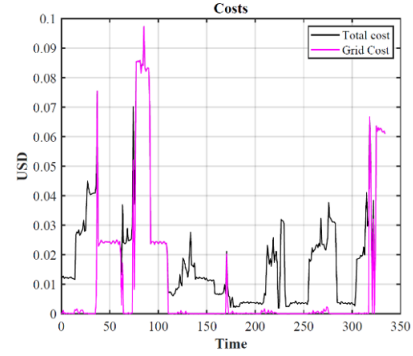


Fig. 3. Cost

V. CONCLUSION

The CC capabilities experimented into the EMS of a cluster of integrated MG facilitate data analysis under a real-time experience and permit a supervised learning model definition beyond offline computing limitations. Conveniently, this close to real-time approach improves the standardized strategic level days-to-hours time frame and decreases that to minutes-to-seconds. In fact, and according to these experimental results, the CREMS architecture could expand to the MG tactical level - the power management. The hardware-in-the-loop testbed inclusion allowed us to examine some framework features like autonomy and scalability. Additionally, it has permitted defining other attributes like cost-effectiveness compared to [19] close to 50% savings in the CC deployment - and Ethernet

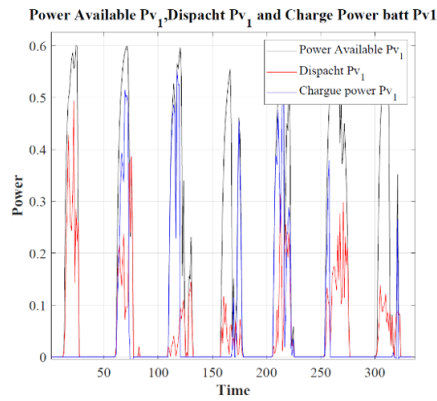


Fig. 4. PV1- Power Available, Dispatch and Charge Power batt

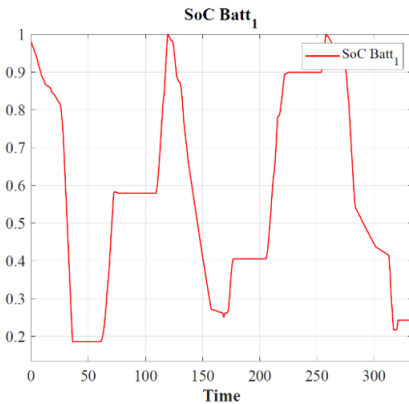


Fig. 5. SoC Batt

bandwidth requirements - 2.56 Mbit/s. Neither [3], [7], [19] nor [33] defined it. For future work, two research directions are worth the analysis effort. The proposed CREMS needs to run in customer-own cloud-premises and cross-platform commercial scenarios. In addition, it would be interesting to improve the optimization problem and include state-of-the-art technologies for the internet of things.

REFERENCES

- [1] D. Manz et Al., "The Grid of the Future: Ten Trends That Will Shape the Grid Over the Next Decade," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 12, no. 3, pp. 26–36, 2014, doi: 10.1109/mpe.2014.2301516
- [2] Y. Parag and B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," Nature Energy, vol. 1, no. 4, 2016, doi: 10.1038/nenergy.2016.32.
- [3] C. A. Macana et Al., "Experiments on a Real-Time Energy Management System for Islanded Prosumer Microgrids," Electronics, vol. 8, no. 9, p. 925, 2019, doi: 10.3390/electronics8090925.
- [4] A. C. Luna et Al., "Online Energy Management Systems for Microgrids: Experimental Validation and Assessment Framework," IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, doi: 10.1109/tpel.2017.2700083.
- [5] D.G. Rosero et Al., "Cloud and machine learning experiments applied to the energy management in a microgrid cluster," Applied Energy, Volume 304, 2021, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117770.
- [6] E. Sanabria et Al., "Microgrid Structure for testing a Real Time Energy Management System Model", 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) DOI: 10.1109/APEC43599.2022.9773556
- [7] D. Rosero-Bernal et Al., "Machine Learning Experiments for a RealTime Energy Management in a Microgrid Cluster," IECON 2021, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589160.
- [8] "AWS" https://aws.amazon.com/ (accessed Jul. 27, 2022).
- [9] "Matlab Production Server" https://la.mathworks.com/products/matlabproduction-server.html (accessed Nov. 24, 2021).
- [10] "S3" https://aws.amazon.com/es/s3/ (accessed Jul. 27, 2021).
- [11] J. F. Patarroyo et Al., "An AC Microgrid Testbed for Power Electronics Courses in the University of Puerto Rico at Mayaguez," 2018 IEEE ANDESCON, 2018, doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564636.
- [12] "OP1400" https://www.opal-rt.com/op1400-4-quadrant-power-amplifier (accessed Jul. 27, 2021).
- [13] E. Gaona et Al., "Gestión y ciberseguridad para microrredes eléctricas residenciales". Doctorado en Ingeniería UD. 2020. ISDN: 978-958-787229-3
- [14] "Elastic compute cloud" https://aws.amazon.com/es/ec2/ (accessed Jul. 27, 2021).
- [15] A. Hernandez, "Energy Management Systems for Microgrids Equipped with Renewable Energy Sources and Battery Units." Aalborg Universitetsforlag, 2017.
- [16] R. Dobrescu et Al., "Using IoT communication infrastructure for improving performance of power microgrids," 2018.
- [17] S. Z. Tajalli et Al., "A Secure Distributed Cloud-Fog Based Framework for Economic Operation of Microgrids," 2019 IEEE TPEC. 2019. doi: 10.1109/tpec.2019.8662201.
- [18] H. Albataineh et Al., "The Design of a Novel Smart Home Control System using Smart Grid Based on Edge and Cloud Computing," 2020 IEEE SEGE, 2020, doi: 10.1109/SEGE49949.2020.9181961.
- [19] W. Donge et Al., "Machine-Learning-Based Real-Time Economic Dispatch in Islanding Microgrids in a Cloud-Edge Computing Environment," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3067951.
- [20] S. Yang et Al., "Implementation for a cloud battery management system based on the CHAIN framework," 2021. Energy and AI. doi: 10.1016/j.egyai.2021.100088
- [21] I. Fatima et Al., "Integration of Cloud and Fog based Environment for Effective Resource Distribution in Smart Buildings," 2018 14th IWCNC. 2018. doi: 10.1109/iwcmc.2018.8450422.
- [22] L. Lei et Al., "Dynamic Energy Dispatch Based on Deep Reinforcement Learning in IoT-Driven Smart Isolated Microgrids," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3042007.
- [23] W. Ali et al., "Hierarchical Control of Microgrid Using IoT and Machine Learning Based Islanding Detection," in IEEE Access, vol. 9, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3098163.
- [24] M. Moghimi et Al., "A Hybrid Communication Platform for MultiMicrogrid Energy Management System Optimization," 2018 IEEE 27th ISIE. 2018. doi: 10.1109/isie.2018.8433861.
- [25] Z. Rostami et Al., "Dynamic Modeling of Multiple Microgrid Clusters Using Regional Demand Response Programs," Energies, vol. 13, 2020, doi: 10.3390/en13164050.
- [26] I.Majumder et Al., "Real-time Energy Management for PV-battery-wind based microgrid using on-line sequential Kernel Based Robust Random Vector Functional Link Network," Applied Soft Computing, 2020. doi: 10.1016/j.asoc.2020.107059.
- [27] A. Cabrera et Al., "Real time Energy Management System of a photovoltaic based e-vehicle charging station using Explicit Model Predictive Control accounting for uncertainties," Sustainable Energy, Grids and Networks, 2022. doi: 10.1016/j.segan.2022.100769.
- [28] A. C. Luna et Al., "Optimal power scheduling for an islanded hybrid microgrid," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). 2016
- [29] U. Langenmayr et Al., "Unit commitment of photovoltaic-battery systems: An advanced approach considering uncertainties from load, electric vehicles, and photovoltaic," Applied Energy, vol. 280, p. 115972
- [30] E. A. Sanabria-Torres et Al., "Design of Proportional-Resonant Controllers for Voltage-Source Converters using State-Space Model," IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589113.
- [31] dSPACE Systems, "Catalog 2018," 2018. [Online]. Available: https://www.dspace.com
- [32] N. I. Nwulu and X. Xia, "Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response," Renewable Energy, vol. 101, pp. 16–28, 2017
- [33] S. DeLand, A.Filion,Data-Driven Insights with MATLAB Analytics: An Energy Load Forecasting Case Study.

TABLE II
RELATED CLOUD-BASED SOLUTIONS ANALYSIS

Framework	References (Year)	Methods or Techniques	Advantages	Limitations
CC	[16] (2018)	Voltage regulation	Operating voltage online optimization	Distributed framework. Testbed not included.
	[17] (2019)	Global control	A combined fog-cloud framework with fuzzy methodology	Distributed EMS restraining the cloud capacities
	[18] (2020)	Two-levels data processing	Edge computing design implemented	Framework not defined
	[19] (2021)	Real-time economic dispatch	Cloud resources usage	Testbed not included
	[20] (2021)	Real-time battery management system	Cloud resources deployment	Testbed not included
ML	[21] (2018)	Algorithm optimization	Load balancing algorithm	Architecture not defined
	[22] (2020)	Deep reinforcement learning (DRL)	DRL algorithms and models	Testbed not included
	[23] (2021)	Hierarchical control	IoT framework	Cloud-computing capabilities misuse
MGC	[24] (2018)	Architecture definition	Hybrid communication platform for the EMS	EMS Cost function does not consider either scalability or autonomy features
	[3] (2019)	Real-time EMS	Testbed usage	Offline optimization
	[25] (2020)	Architecture definition	Multiple MGC modeling	Focused on frequency control under simulation
	[26] (2020)	Real-time EMS - Architecture definition	Algorithms	Limited testbed
	[27] (2022)	Real-time EMS	Tested usage	Offline optimization

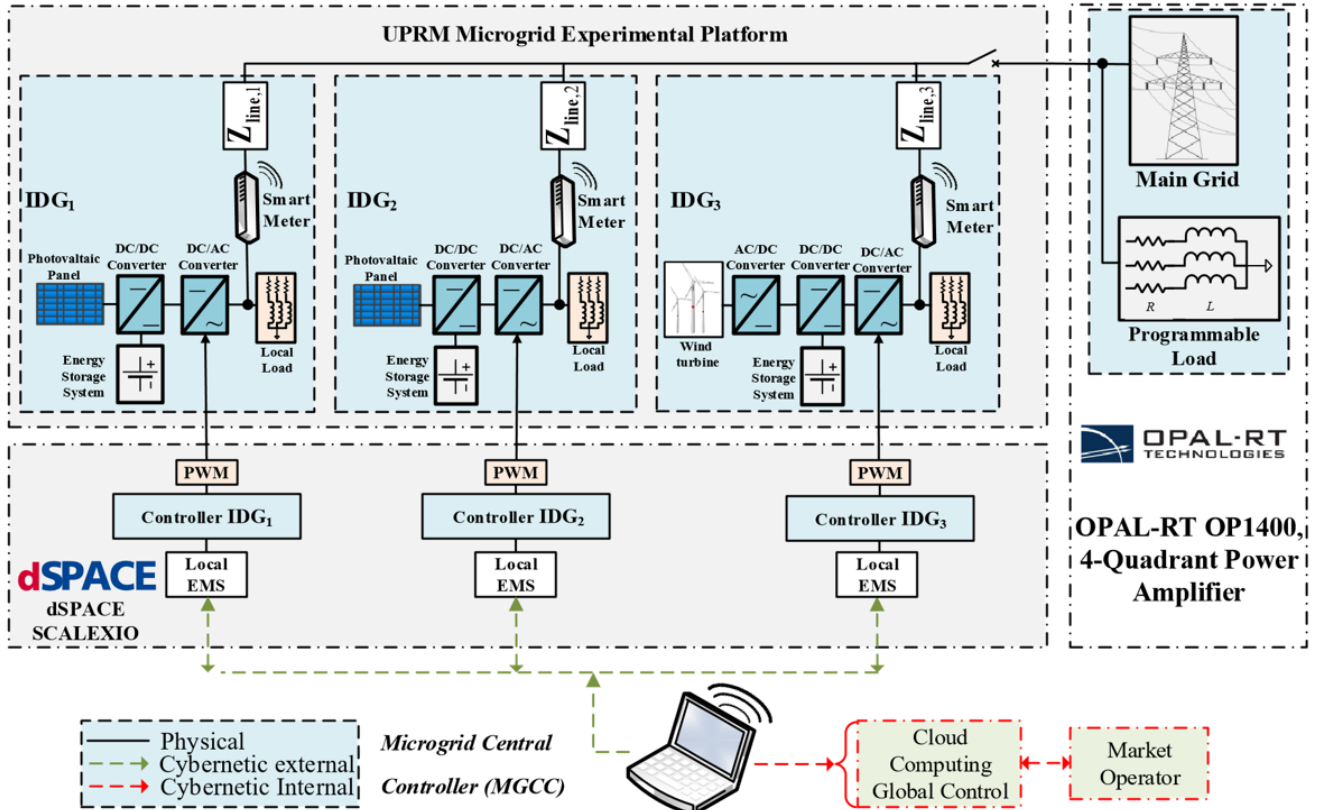


Fig. 6. Implemented Microgrid Cluster.



David Rosero-Bernal Serial Entrepreneur, Board Member, Professor. Electronic Engineer (2002), M.Sc. in Electronic Engineering (2004). MBA (2013). Doctoral Student (Current). His research interest focused on disruptive technologies that produce revenue

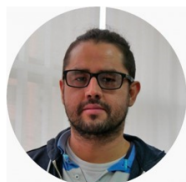


Enrique Sanabria-Torres Received the B.S. degree in electronics engineering from the Universidad Central, Bogota, Colombia in 2019 and M.S. degree in Engineering with emphasis on microgrids and power electronics from the University of Puerto Rico at Mayaguez (UPRM) in 2022. In 2020, he joined the Sustainable Energy Center (SEC) at UPRM as an M.S. researcher. His main research interests include analysis, design, and control of power electronic converters, as well as optimal dispatch for microgrids.



Fabio Andrade-Rengifo Ph.D. degree from the Universitat Politecnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain, in 2013, B.Sc in electronic engineering and Master degree in Engineering from the Universidad Del Valle, Cali, Colombia in 2004 and 2007, respectively. In 2014, He worked as a Postdoc researcher in UPC and Aalborg University, Denmark. Currently, he is working as the director of the Sustainable Energy Center (SEC) in the University of Puerto Rico, Mayaguez campus. His main research interests include modeling, analysis,

design, and control of power electronic converters and Microgrid application



Nelson Díaz-Aldana received the B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2008, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia in 2011, and the Ph.D. degree in Energy Technology from the Aalborg University, Aalborg, Denmark, in 2017. He is a Full Professor in the Department of Electronic Engineering, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. His main research interests include energy management

systems for microgrids



Cesar Trujillo-Rodríguez received the B.S. degree in Electronics Engineering from the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2003, the M.Sc. degree in Electrical Engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia in 2006, and the Ph.D. degree in Electronics Engineering from the Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, in 2012. He is a Full Professor in the Department of Electrical Engineering, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, where he currently teaches courses

on analog circuits and power electronics. His main research interests include modeling and control of power converters applied to the distributed generation and microgrids.

Teleoperación de robots mediante ROS e Internet

Manuel E. Lugo M.¹, Felipe González R.¹, Pedro-F. Cárdenas¹
(mlugom,fegonzalezro,pfcardenash@unal.edu.co)

Resumen—En el campo de la industria y de las aplicaciones en ingeniería actualmente está tomando importancia la necesidad de operar robots de manera remota. Este trabajo consiste en una implementación al problema de teleoperación de robots, mediante el *framework* de uso libre *Robot Operating System* (ROS) y un modelo basado en Internet, aplicado específicamente al robot PincherX-100. El desarrollo consistió en realizar la operación del robot de manera articular, es decir, articulación por articulación, utilizando una interfaz gráfica presente en una aplicación Web desarrollada. Se utilizó un modelo cliente-servidor que permitió realizar la operación de tres maneras: localmente, en una red local y en una red externa. Los resultados conseguidos plantean un amplio potencial para la utilización de implementaciones de este estilo, dada la versatilidad del modelo utilizado y la solución conseguida.

Palabras Clave—Teleoperación, Robots, ROS, Internet, Modelo cliente-servidor

I. INTRODUCCIÓN

EL campo de la robótica y de las aplicaciones con robots continúa creciendo día a día. Las grandes tecnologías que siguen expandiéndose a partir de la cuarta revolución industrial se hacen cada vez más relevantes [1]. En particular, en diferentes tipos de aplicaciones surge la necesidad de operar los robots de manera remota; entre las razones principales se encuentran la necesidad de suprimir cableados, la versatilidad de un control remoto estableciendo una zona local y otra remota, y la imposibilidad de estar presente todo el tiempo en el lugar de operación; entre otras que le dan importancia a la teleoperación [2]. Este trabajo es una propuesta de solución al problema mencionado, aplicada como caso de estudio a la operación remota de un robot serial de cuatro grados de libertad rotacionales. El robot es conocido comercialmente como PincherX-100, y es de la marca *Trossen Robotics* [3].

El conjunto de tecnologías que comprenden la operación o gobierno a distancia de un dispositivo por un ser humano, en el mundo de la robótica, es conocido como Teleoperación. Por tanto la acción de teleoperación consiste en comandar a distancia el dispositivo. El dispositivo que ejecuta la acción se conoce como dispositivo teleoperado. El comando puede ser dado a través de un *joystick*, un teclado, entre otros; el dispositivo teleoperado puede ser un robot móvil o un manipulador, entre otros.

En la figura 1 se observan los elementos básicos de sistema de teleoperación. En la zona local, está el operador, el

dispositivo de control, la computadora local y el dispositivo de realimentación. En la zona remota se encuentra el computador remoto, el dispositivo teleoperado y su entorno, y los sensores. Las zonas local y remota están conectadas en general a través de un canal de comunicaciones bidireccional.

La teleoperación se ha abordado desde diferentes enfoques,

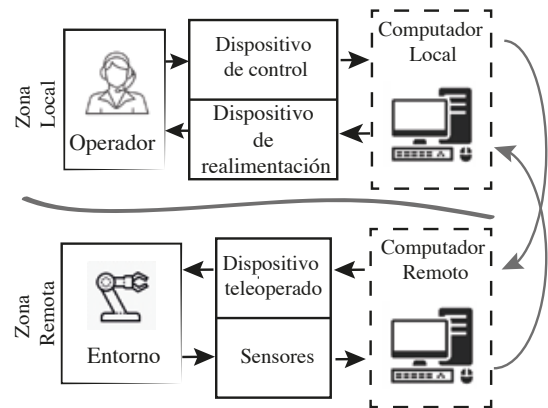


Figura 1: Elementos generales de un sistema de teleoperación

en general, esta puede ser aplicada a brazos manipuladores o a robots móviles (véase [4], [5] y [6]). En [4], Kasim M. Al-Aubidy et al. realizan la teleoperación de un robot móvil con propósitos de sensado de diversas variables, mediante una interfaz en la que se envían comandos al robot a través de Internet, y se reciben los datos escaneados también a través de Internet y de señales multifrecuenciales (DTMF). En [5], Meng Wang y James N. K. Liu también solucionan la operación de un robot móvil, realizando lo que ellos llaman *tele-comando* a través de un *joystick* y a través de comandos de voz avanzados. Se menciona que usan un modelo de acción por eventos, que le permite al robot responder deliberadamente a los eventos esperados. En el caso de robots manipuladores, en [6], Guanglong Du et al. realizan la operación de un robot serial a partir del reconocimiento de la postura de la mano mediante un *Kinect*. Se menciona que se estima la posición del pulgar y del índice a partir del procesamiento de las imágenes de profundidad, para posteriormente estimar la pose de la mano. Con esta pose se especifica la pose deseada del efector final del robot.

Este trabajo se diferencia de los trabajos de [4] y [5] primordialmente por el uso de un robot serial, y del de [6] por el hecho de que se realiza la operación basada en Internet. En términos generales, en este trabajo se realizó la operación remota del robot serial mencionado en un modelo basado en Internet, mediante una interfaz gráfica de usuario

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia {mlugom,fegonzalezro,pfcardenash}@unal.edu.co

que permita enviar comandos de movimiento al robot. Los resultados esperados al implementar la solución apuntaron a la posibilidad de concluir acerca de la factibilidad de operar desde cualquier red externa al robot, de las desventajas que podrían presentarse al operar desde la red externa en caso de ser posible, y del desempeño en la operación. Para consignar los resultados se realizaron pruebas con la implementación obtenida del trabajo.

El presente documento se esta organizado en las secciones de Métodos, Resultados, Análisis y Conclusiones. En la sección de Métodos se describen las acciones tomadas y los procedimientos realizados en cada uno de los aspectos principales del trabajo; en la sección de Resultados se describe el funcionamiento obtenido con la implementación de la solución y se presentan algunas medidas de desempeño tomadas; en la sección de Análisis se trata con más profundidad los resultados obtenidos y se analizan los mismos; y en la sección de Conclusiones se finaliza el documento con aspectos clave que fueron concluidos con el trabajo y puntos potenciales para el avance en trabajos futuros.

II. MÉTODOS

II-A. Estructura de teleoperación

El esquema presentado en la figura 2 describe la zona local y remota del sistema de teleoperación desarrollado. En términos generales, en la zona local se encuentra el operador utilizando un dispositivo con acceso a Internet que funge como dispositivo de control, al enviar comandos a la zona remota; como dispositivo de realimentación, al recibir el estado de las articulaciones del robot; y como computador local, al ser puerto de comunicación directo con la zona remota. Por su parte, en la zona remota se encuentra el robot físico, correspondiente al entorno, el cual se conecta a un computador que funge como dispositivo teleoperado, al estar sujeto a los comandos enviados desde la zona local; y como computador remoto, al ser igualmente puerto de comunicación directo con la zona local. Los sensores de la zona remota corresponden a los *encoders* integrados al robot.

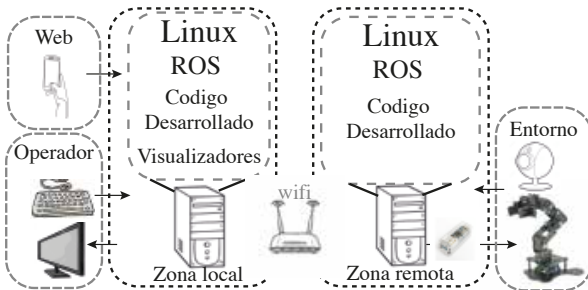


Figura 2: Configuración del sistemas de teleoperación desarrollado

II-B. ROS

La utilización de ROS [7] fue primordial en este trabajo. Su estructura de comunicaciones permitió una gran escalabilidad

en la implementación de la solución. La estructura de comunicaciones se resume en nodos que se intercambian información entre sí publicand y suscribiéndose a tópicos, y nodos que ejecutan acciones llamando a servicios en particular. En la figura 3 se puede apreciar un grafo de ejemplo con una muestra de la estructura mencionada.

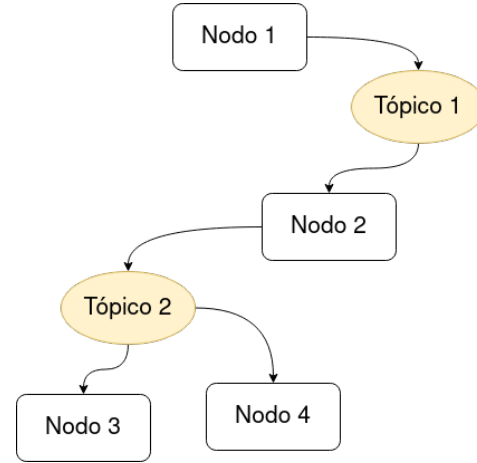


Figura 3: Grafo de ejemplo de la estructura de comunicaciones de ROS.

Con la utilización de ROS, los comandos de movimiento hacia el robot se pudieron dar a través de la publicación de mensajes a un tópico en particular, o del llamado a un servicio en concreto.

II-C. Dynamixel Workbench

El robot PX-100 cuenta con servomotores *Dynamixel*. Estos servomotores se pueden operar de manera local desde ROS, mediante el paquete *Dynamixel Workbench* [8]. El esquema de conexión del robot con el computador se presenta en la figura 4. Se observa que el robot se conecta al puerto USB del computador utilizando un conversor *Future Technology Devices International* (FTDI), que básicamente es un conversor de conexión USB a conexión serial de *Dynamixel*.

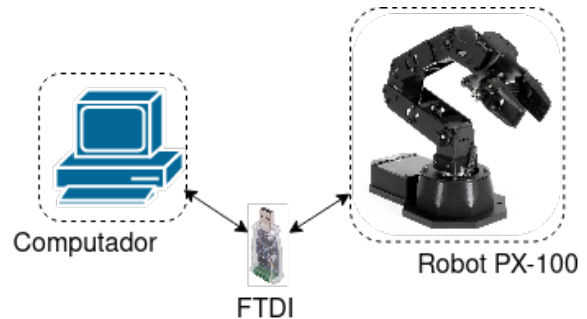


Figura 4: Esquema de conexión para el robot PX-100 usando el conversor FTDI y un computador.

El procedimiento para poder implementar el paquete a la operación del robot consistió de dos pasos:

1. **Activar los controladores de los motores.** Ello se logró lanzando el nodo `dynamixel_workbench_controllers` del

paquete, colocando como parámetros, entre otras cosas, los identificadores de las articulaciones del robot, el puerto USB al que se conecta el robot y la tasa de baudios por segundo utilizada para la comunicación. La documentación del paquete [8] incluye un archivo de tipo *launch* con un ejemplo del lanzamiento de este nodo.

2. **Comandar desde referencias de posición angular.** Se logró mediante el llamado al servicio `/dynamixel_command` del paquete. Este servicio recibía como argumentos el nombre del comando, que por defecto puede quedar vacío; el ID de la articulación que se desea comandar, cuyo valor se encuentra entre 1 y 5; el nombre del registro que se desea editar, que en este caso correspondía al registro de posición objetivo; y el valor de la referencia de posición, mapeado como un número entre 0 y 4095 dependiendo del ángulo objetivo.

II-D. Conexión remota

Se implementó la teleoperación teniendo en consideración que un usuario con cualquier dispositivo con acceso a Internet debería poder acceder a una interfaz de comando del robot. Por esa razón, se optó por establecer un modelo cliente-servidor, realizando la comunicación utilizando el Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP) y el servicio de *WebSocket*. En el modelo, se planteó que el servidor fuera el computador con el robot conectado (*Robot Personal Computer*, abreviado como RPC), y el cliente fuera un dispositivo cualquiera con acceso a Internet (*Client Device*, abreviado como CD); por lo tanto, los servicios mencionados son ambos provistos por el RPC, respectivamente en los puertos 5000 y 9090. En la figura 5 se presenta un diagrama que resume este modelo.

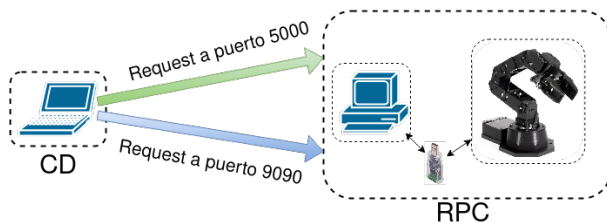


Figura 5: Esquema del modelo cliente-servidor utilizado para la teleoperación del robot PX-100.

Para que el modelo cliente-servidor se pudiera implementar independientemente del la red local en la que se encontrara el cliente, se realizó un proceso de reenvío de puertos o *port forwarding*, el cual consiste en habilitar el *router* de la red para que, al recibir una solicitud desde una red externa a través de un puerto determinado, este reenvíe la solicitud al servidor correspondiente (RPC en este caso), todo ello mediante las direcciones IP. Un diagrama que ejemplifica este reenvío de puertos se presenta en la figura 6.

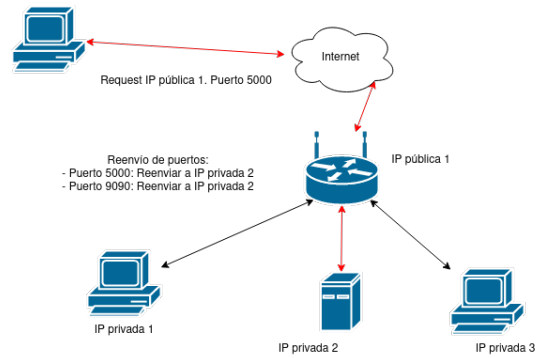


Figura 6: Esquema de ejemplo del reenvío de puertos utilizado para la operación desde redes externas.

II-E. Interfaz Web

En la figura 7 se puede observar una imagen de la interfaz web desarrollada para la operación. Esta interfaz se desarrolló utilizando *HTML*, *Bootstrap* y *Javascript*. La interfaz está pensada para que se opere el robot articulación por articulación. El movimiento de cada articulación es controlado por un *slider* cuyo valor varía entre los límites de la articulación en cuestión (véase figura 8). Además, se implementó un botón de lectura de estados actuales de las articulaciones (véase figura 9), cuyo propósito es que los *sliders* ajusten sus valores a los valores de posición angular presentes en el robot, de manera que cuando se modifiquen sus valores, este no presente movimientos súbitos e impredecibles.

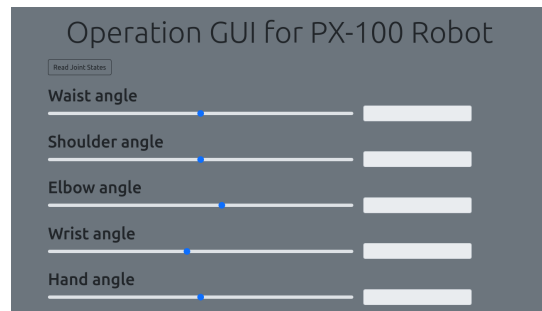


Figura 7: Interfaz Web de comando del robot PX-100.

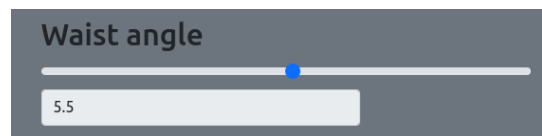


Figura 8: *Slider* de comando de la articulación de la cadera del robot, presente en la interfaz Web.

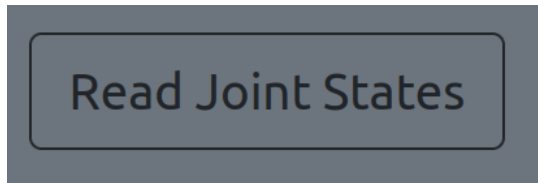


Figura 9: Botón de lectura de estados implementado para el ajuste automático de los *sliders* en los valores correspondientes a la configuración actual del robot.

III. RESULTADOS

Se integró y se puso en marcha la solución para la operación del robot desde la interfaz Web, realizando pruebas de tres maneras: localmente en el RPC, en una misma red local y en una red externa. En general, el funcionamiento es el esperado en los tres casos.

De los casos, se tomaron los siguientes resultados de desempeño:

Tabla I: Resultados de desempeño de la teleoperación del robot en tres diferentes casos de prueba

Caso de prueba	Aspecto			
	Respuesta de los <i>sliders</i>	Respuesta del botón de lectura	Tiempo de retraso en la respuesta (s)	Continuidad del movimiento
Localmente	Correcta	Correcta	0.10	Muy alta
Misma red local	Correcta	Correcta	0.63	Muy alta
Red externa	Correcta	Correcta	1.01	Algunas intermitencias

IV. ANÁLISIS

En los tres casos de prueba, se logró que el robot PX-100 respondiera correctamente a los comandos enviados por el usuario al reajustar los valores de los *sliders* en la interfaz Web, lo que permite concluir que se cumple con el objetivo planteado. Sin embargo, son notorias las limitaciones que se presentan en términos de las redes de computadores, particularmente en la velocidad de respuesta y la continuidad en el movimiento. Realmente los tiempos de retraso presentados se deben a los tiempos que tarda el envío de paquetes mediante las redes. Esta particularidad de las redes hace que la velocidad de respuesta disminuya conforme se hace más remota la operación, y a su vez, hace que se presenten intermitencias al implementar el modelo en una red externa.

En términos de la seguridad de la operación del robot con la solución implementada, los riesgos que pueden presentarse son de cambios elevados en la posición de cualquiera de las articulaciones del robot, que pudieran causar que este colisionara con el suelo, algún obstáculo o alguna persona aledaña. Este riesgo se mitiga al usar el botón de lectura de estados, pero tiene una oportunidad de mejora muy interesante teniendo en cuenta que puede suceder que el usuario olvide presionar el botón antes de comenzar a ajustar los *sliders*. Lo que correspondería en este caso sería ajustar la lógica de la interfaz Web para que no permita el ajuste de *sliders* sin un previo clic del botón de lectura.

V. CONCLUSIONES

La teleoperación de robots a través de la solución implementada con la interfaz Web de comando y el modelo cliente-servidor se efectuó de forma adecuada, en el sentido de que se cumplen los dos objetivos principales planteados: la operación remota funcional del robot PincherX-100 mediante el movimiento de sus articulaciones, y la posibilidad de que el usuario que opere el robot, lo haga desde cualquier dispositivo con acceso a Internet. El cumplimiento de estos objetivos permite concluir que la solución implementada estuvo bien seleccionada de entre las otras posibles soluciones al problema de la teleoperación ¹.

Con este trabajo se reafirma la amplia versatilidad y la conveniencia que tiene ROS para los ingenieros, investigadores y desarrolladores. ROS permitió integrar de manera eficiente todos los aspectos expuestos, y con ello se logró llevar a cabo la solución que se planteó. Se puede concluir que hay un campo vasto para continuar con la investigación en ROS, puesto que de ahí pueden seguir saliendo soluciones a los problemas de la actualidad.

La solución conseguida en este trabajo es totalmente escalable, tanto que tiene un potencial grande para un trabajo futuro en teleoperación de robots. Con la estructura planteada se pueden llegar a realizar implementaciones más extensas, no sólo en robótica serial sino también en robótica paralela, robótica móvil y demás áreas en las que se pueda requerir realizar operación remota.

REFERENCIAS

- [1] T. L. Olsen y B. Tomlin, "Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management", *Manufacturing & Service Operations Management* 22(1), 2019, pp. 113-122, doi: 10.1287/msom.2019.0796.
- [2] H. B. Barua, A. Sau, R. d. Roychoudhury, "A Perspective on Robotic Telepresence and Teleoperation using Cognition: Are we there yet?", *arXiv*, 2022, doi: 10.48550/ARXIV.2203.02959.
- [3] Trossen Robotics, "PincherX 100 Robot Arm". [Artículo de Internet]. Disponible en: <https://bit.ly/3AGwQif>. [Accedido: 11-jul-2022]
- [4] K. M. Al-Aubidy, M. M. Ali, A. M. Derbas y A. W. Al-Mutairi, "GPRS-based remote sensing and teleoperation of a mobile robot", *10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13)*, 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/SSD.2013.6564166.
- [5] M. Wang, J. N. K. Liu, "Interactive control for Internet-based mobile robot teleoperation", *Robotics and Autonomous Systems, volume 52, issues 2-3*, 2005, pp. 160-179, doi: 10.1016/j.robot.2005.04.001.
- [6] G. Du, P. Zhang, J. Mai, Z. Li, "Markerless Kinect-Based Hand Tracking for Robot Teleoperation", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012, doi: 10.5772/50093.
- [7] Stanford Artificial Intelligence et al, "Robotic Operating System", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ros.org>.
- [8] Robotis, "DYNAMIXEL Workbench". [Manual electrónico]. Disponible en: <https://bit.ly/3RmBbNE>
- [9] Morteza Ghobakhloo, "Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability", *Journal of Cleaner Production, Volume 252*, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869.

¹Todo el producto conseguido con este trabajo se encuentra alojado en el repositorio de *GitHub* disponible en: https://github.com/mlugom/px100_teleop

Study of the Correlation between Ground Flash Density, Population Density and Lightning Mortality in Colombia – Progress Report

Villamil-Rojas, D., Rojas, H. E., Santamaria, F.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
(devillamils,herojasc,fsantamariap@udistrital.edu.co)

Abstract—The high lightning activity in Colombia is a factor that endangers the population. This condition is relevant considering that the distribution of the number of cloud-to-ground lightning strikes over the Colombian territory is mostly concentrated in some areas, namely at the center and north of the country. Assuming that the populations most exposed to lightning across the country are those who live in places where its activity is most frequent, a research project is being developed to establish a relationship between the ground flash density (GFD), population density (PD), and the certified lightning deaths for the period 2013-2020. This has been possible by integrating the information provided by the GL360 lightning location system, owned by Vaisala inc., the official certified deaths by lightning, and the use of geographic information systems (GIS) tools. The expected result is a map that allows identifying the places with the greatest vulnerability, and therefore, could have the greatest lightning risk.

Index Terms—Disaster risk management, geographic information systems, ground flash density lightning, population density.

I. INTRODUCTION

SOMETIMES natural phenomena observed in everyday life represent multiple threats to the well-being and lives of people. Most of them are associated with large-scale hazards such as earthquakes, floods, volcanic eruptions, and landslides, among others, which have the potential to cause numerous losses of human lives and considerable damage to infrastructure in a single event. For the estimation of risk from disasters caused by these high-intensity hazards (intensive risk), generally there are available methods that are articulated within the prevention policies and response protocols established by government authorities.

Despite this, cloud-to-ground lightning flash is a natural phenomenon that is characterized by producing a low-intensity impact, but cumulative over time (extensive risk). This high current transient is responsible for at least 4000 deaths per year worldwide [1]. The main peculiarity of these fatalities is that they typically do not occur simultaneously or in the same place, but occur in different places and at different times. This fact makes recording events involving lightning fatalities more difficult than counting deaths due to a large-scale disaster. This data is essential for estimating the risk posed by lightning in a specific period over a particular area [2].

Due to the difficulty to obtain specific information about the number of deaths caused by lightning, in recent years, few

countries have updated their data to obtain lightning mortality rates, both at the municipal and national levels. In addition, it is necessary to develop techniques to estimate these rates in regions where deaths by lightning are not recorded. One of these techniques is the proposal of Roeder et al. in [3], in which geographic information systems (GIS) are used to multiply the ground flash density (GFD) and the population density (PD) for a given area in a specific region (delimited by the settled grid in the GIS software) and display the results using a map. These results are then compared with known lightning mortality data and a correlation between the three variables is established. Roeder et al. recommend the implementation of this method for lightning risk estimation in developing countries.

Considering that Colombia is a country with one of the highest GFD values in the world [4], including rural and urban areas with documented GFD values higher than 40 flashes/km²-year [5], it is important to know the correlation between the GFD, the PD and the certified deaths by lightning. This Analysis, based on remote sensing of lightning, geospatial visualization and data processing, and its relationship with other sociodemographic factors, could be a starting point for estimating the lightning risk in the Colombian territory.

II. GEOSPATIAL VISUALIZATION OF NATURAL DISASTERS

The Colombian Spatial Data Infrastructure (ICDE in Spanish), created from CONPES 3585/2009 [6], is the entity responsible for providing the services for the production and management of geographic information through the establishment of technical guidelines. One of the principles of the geographic information management presented by the ICDE is standardization, which is oriented to "ensure the appropriate use of information and technologies, as well as their interoperability, and the implementation of methods, standards, and procedures to facilitate the capture, management, consultation, dissemination, and access services to geographic information" [7]. The ICDE also incorporates the principles of Leadership, Management, Access, Quality, Cooperation, and Security in its geographic information management scheme.

Taking into account the principles established by the ICDE, the process of information production starts by establishing user needs and how geographic infographics (GI) will be developed in the political and market context. Next, the resources

(human resources and technology), institutional arrangements, budgets, and activities required for product development are determined. The outline of this production process is presented in Fig. 1

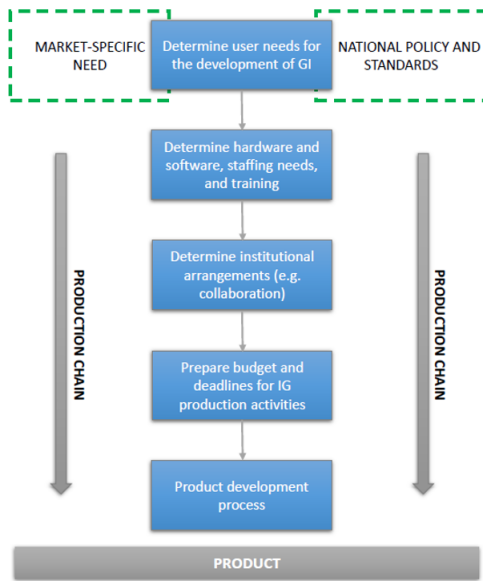


Fig. 1. Geographic information production process. Adapted from [14]

In this context, GIS tools have been used in Colombia to generate products in multiple areas such as municipal planning, habitat conservation, marketing of agricultural products, road network management, and georeferencing for the study of events that affect health such as cerebrovascular diseases, malaria, COVID-19, tuberculosis, maternal mortality, poisonous bites, among others. In [8] and [9], a review of these and other research applications of GIS in Colombia is presented.

Other phenomena that have a significant impact on public health are natural hazards. In recent years, studies have been conducted to understand the epidemiology of natural disasters, considering the high number of victims they cause [10]–[12]. For this purpose, GIS is an essential element that allows incorporating geospatial analysis in disease research and the analysis of the distribution and frequency of natural disasters. For example, the research presented in [13] shows a case of flood risk in the municipality of Cota, located in the upper basin of the Bogotá River, for which the GIS tools are used to study and analyze the hazard of this geographical condition. One of the main results of this study is that the low slope level of the municipality increases its vulnerability to flooding. An additional result is that the flood zones present repetitive historical behavior.

Another example is the case of Manizales (main city located in the department of Caldas), where a study about the location and access of the fire department in the event of emergencies is presented [15]. Through a territorial accessibility analysis, the coverage of fire stations with respect to transportation infrastructure is evaluated to identify the relationship between the response times and the areas of attention according to their corresponding socioeconomic level. The obtained results can

contribute to better management of fire events, including those caused by natural phenomena like heatwaves and lightning.

In this way, the development of GIS-based risk maps is essential for the analysis and reduction of lightning risk in Colombia. It is expected that more maps of this kind are developed and shared with the community and the entities in charge of managing natural disasters in the country.

III. REMOTE SENSING OF LIGHTNING

Remote sensing can be defined as the "science and art of obtaining information about an object, area or phenomena through the analysis of data, acquired by a device, that is not in contact with the object, area or phenomena under investigation" [16]. The electromagnetic radiation that is reflected or emitted from the object, area, or phenomena under study makes it possible to determine its characteristics by using a remote sensing system [17]. According to Kumar [16], the essential components of remote sensing are an uniform energy source emitting electromagnetic radiation, a non-interfering atmosphere, a reflection and emission interaction with the object of study, a remote sensor that collects and records the electromagnetic radiation coming from the object, a data processing system, and an application for the interpretation and analysis of the obtained information.

One of the remote sensing applications that has been on the rise for a few decades is lightning location systems (LLSs), whose function is the detection and georeferencing of lightning flash events. LLSs can be satellite-based or ground-based. The first group uses two types of sensors, the OTD (Optical Transient Detector) and the LIS (Lightning Imaging Sensor), devices known as LEO (Low Earth Orbit). These instruments are capable of detecting optical pulses coming from lightning at any time of the day [4], [18], [19]. On the other hand, ground-based LLSs use sensors equipped with electronic instrumentation that allows them to capture electromagnetic signals generated by lightning and distinguish them from other signals resulting from electromagnetic radiation in the surrounding environment. The lightning geolocation techniques employed by satellite-based LLSs are Optical Imaging and Very High Frequency Direction Finding (VHF-DF), while the techniques most commonly used by ground-based LLSs are Time of Arrival (TOA), Time of Group Arrival (TOGA), and Direction Finding (DF), each with particular characteristics of accuracy, efficiency, and reliability [20].

In several countries, one of the motivations that has generated the implementation of LLSs is to have historical records of the lightning flashes over their territories. These data are stored and processed to identify the areas with the highest lightning activity, generally through the flash density (FD) and the ground flash density (GFD). The FD considers all types of lightning (cloud-to-ground, cloud-to-cloud, cloud-to-air, and intracloud), whereas the GFD considers only cloud-to-ground lightning.

The GFD is the parameter highlighted in the Colombian lightning protection standard NTC 4552 [21] and also in the standard IEC 62305 [22], which indicates the number of cloud-to-ground lightning strikes over a square kilometer in a

period of one year. Therefore, to calculate the GFD for several years it is necessary to add the annual GFD and divide it by the number of years. Thus, providing information related to lightning activity in a particular area can be used in scientific research and the decision-making of several companies (energy, telecommunications, oil, and gas, among others) and government entities.

Some countries that have published studies related to GFD in South America are Argentina [23], Brazil [24], and Colombia [25], [26]. The LLSs used to develop these studies are diverse and they are owned by multinational companies that are responsible for providing all the infrastructure and technical support. Currently, the companies that are leading the lightning location systems market in the world are Earth Networks® [23], [27], Vaisala Inc.® [28]–[30], and LINET® [31].

Vaisala Inc. has available to the public on its website a global map of FD for the period 2016-2021 using a ground-based LLS called Global Lightning Dataset - GLD360 system [32], making differentiation in color scale according to the corresponding value. Fig. 2 shows a zoom of this map over South America, where it can be observed that most of the countries have an average FD value between 16 and 32 flashes/ $\text{km}^2 - \text{year}$, including Colombia with an average density of 31.3 flashes/ $\text{km}^2 - \text{year}$. An approach to Colombia is presented in Fig. 3 to identify that the departments with the highest FD are located in the northern-center part of the country with values greater than 64 flashes/ $\text{km}^2 - \text{year}$. Without the availability of this type of maps, made with remote sensing and GIS tools, it would not be possible to identify the regions with the highest lightning activity.

IV. APPROACHING LIGHTNING RISK ESTIMATION IN COLOMBIA

As it is indicated in [33], the risk from lightning has not been managed up to date, neither in Colombia nor in any country in the world. One of the main reasons for this situation is that lightning is not considered a significant concern of safety by most international and local authorities [34], even when several research publications report that lightning claims the life of more than 4000 people worldwide [1], [35]–[37]. In the case of Colombia, 757 lightning fatalities were reported for the period 2000-2009 [38] and 1173 for the period 1997-2014 [39]. Moreover, 72 deaths and 210 injuries occurred in the Colombian National Army between 2003 and 2012 were reported in [40]. In this way, maps where the relation between the number of lightning fatalities and other variables such as GFD and PD are presented can be seen as one of the first approaches in order to involve lightning risk in the national and international context and relate its results with disaster risk management. All this, considering that the main purpose of this kind of studies is to reduce the number of deaths due to this natural phenomenon.

Currently, the project development by the GISE3-UD research group is following the methodology presented in [2]. In this way, the number of lightning fatalities in Colombia is obtained considering the official certified deaths according

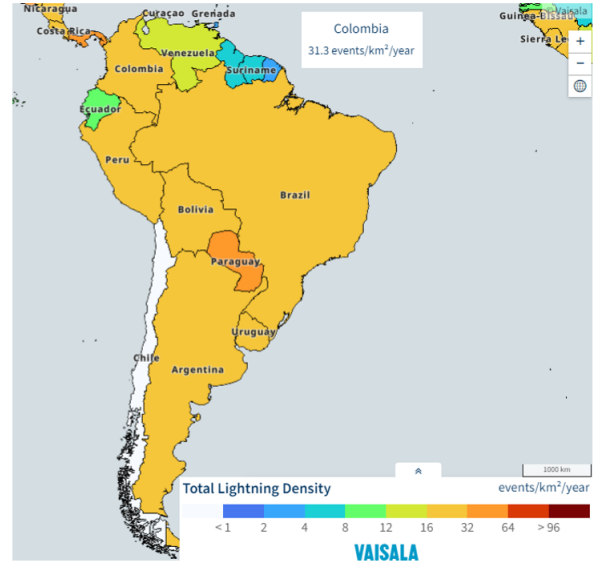


Fig. 2. Flash density in South America for the period 2016-2021. Taken from [32]

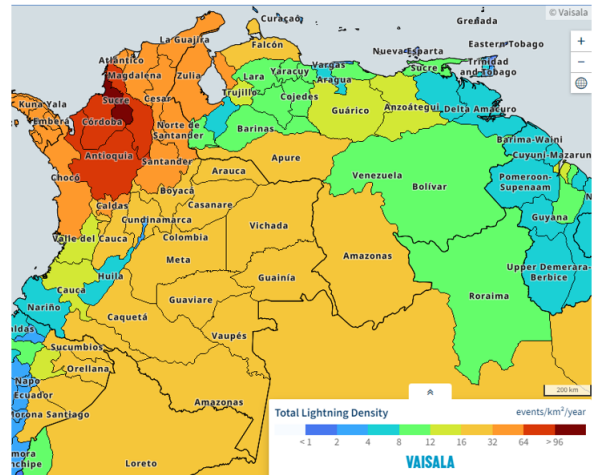


Fig. 3. Flash density in Colombia by department for the period 2016-2021. Taken from [32]

to the codes T750 and X33 of the International Classification of Diseases 10th Revision Procedure Coding System (ICD-10-PCS), which are compiled by the National Administrative Department of Statistics (DANE in Spanish). At this moment, data on this subject is available until 2020, having a total of 707 official deaths by lightning for the period 2008-2020 in the whole country [41]. Additionally, under a research cooperation agreement between GISE3-UD and Vaisala Inc., lightning activity data from the GLD360 network for the period 2013-2020 are available for geoprocessing at a municipal level, which is a resolution never seen before in published GFD maps of Colombia. This multiyear GFD map, presented in Fig. 4, was developed by using the ArcMap tool of ArcGIS 10.5 software to obtain the number of cloud-to-ground lightning flashes that occurred within every single area defined by the boundaries of each municipality. This parameter was obtained for each year, and then the total value (the result of the sum

of annual GFD) is divided by 8. The geospatial join between the GFD presented in Fig. 4, the PD of each municipality, and the lightning fatalities in Colombia leads to the lightning fatality risk map shown in Fig. 5. This result comes from the methodology presented in [3] as the product of the mean GFD (2013-2020) and the PD (2018 national census). The black dots included in Fig. 5 represent the individual lightning fatalities (2008-2020). The next step will be to assess the possible correlation between the three variables analyzed to determine if the methodology proposed in [3] is suitable for Colombia, which is intrinsically a comparison between a developed and a developing country.

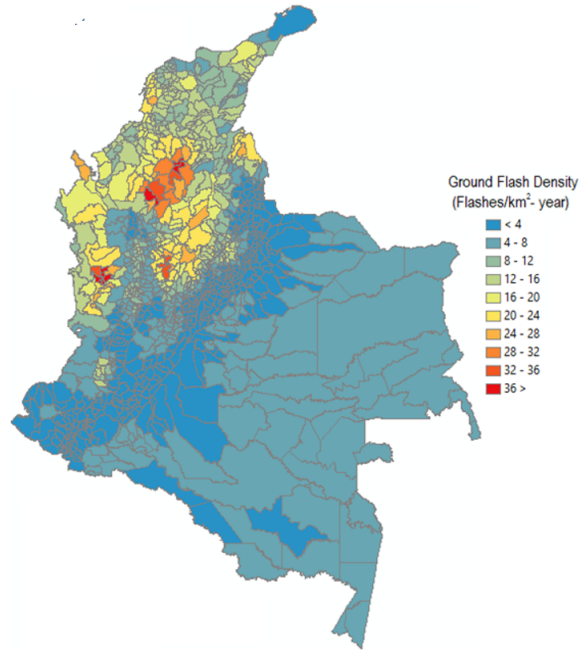


Fig. 4. Ground flash density map for Colombia by municipality for 2013-2020.

According to the Economic Commission for Latin America and the Caribbean (CEPAL in Spanish), the 1103 municipalities of Colombia can be grouped into 154 provinces, each composed of municipalities with similar components regarding natural resources and human settlements, and classified into urban provinces, intermediate provinces, and rural provinces. This grouping is defined in accordance with the travel times by car on main roads to urban provincial capitals [42]. This classification was considered to analyze the possible correlation between the GFD, the PD, and the certified lightning deaths.

Fig. 6 shows the relation between the lightning-deaths density versus the lightning-mortality risk, where each dot represents a province. Two statistical trendlines are also presented, the lineal regression (green) and the second-order polynomial regression (orange). The first regression has an $R^2 = 0.42$ (the half of the value presented in [3]), while the latter exhibits an $R^2 = 0.45$, which are the ones with the highest R^2 values. Both R^2 values show a low correlation between the three variables, mainly influenced by the low number of officially reported lightning fatalities.

The CEPAL recommends the Unsatisfied Basic Necessi-

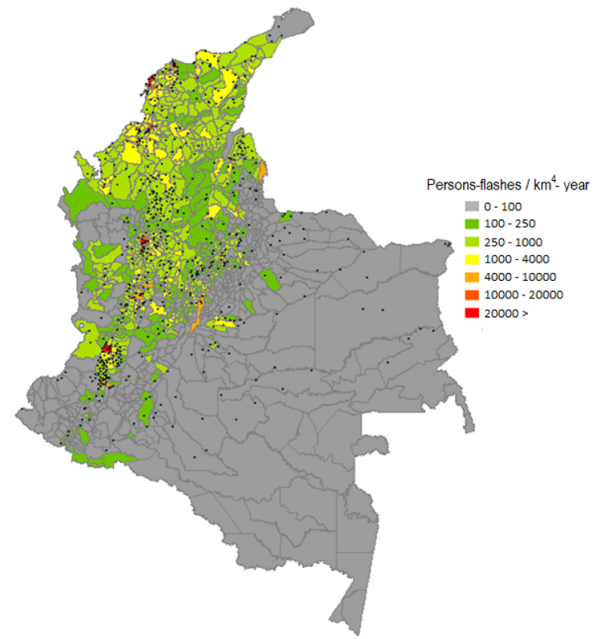


Fig. 5. Lightning fatality risk map for Colombia.

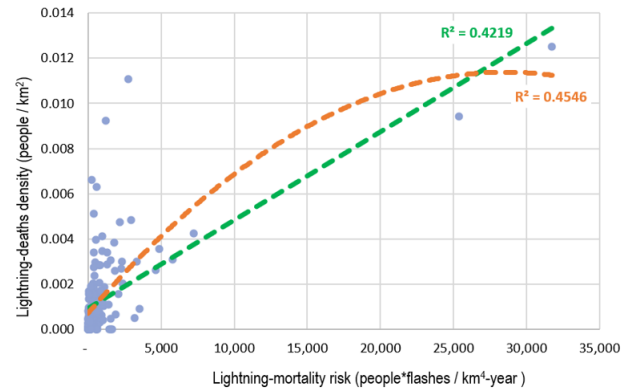


Fig. 6. Lightning-deaths density vs lightning-mortality risk (GFD*PD).

ties (UBN) methodology as a useful tool to characterize the population in Latin America [43]. Among the different UBN indicators, DANE selected for Colombia the following as basic indicators: Inadequate housing, Housing with inadequate services, Critically overcrowded housing, Housing with school-age children not attending school, and Housing with high economic dependency [44]. Considering this, data from the last national census (performed in 2018) allows estimating other lightning-mortality risk values by using the UBN indicators. For example, a relation between the lightning-deaths density versus the Inadequate housing indicator can be analyzed, taking into account that the construction materials used in floors, walls, and ceilings can increase or decrease the risk of being injured by lightning inside dwelling structures [45]. In Fig. 7, the result obtained shows an even lower correlation than the one presented in Fig. 6, showing that multivariate analysis may be preferred over univariate analysis, particularly when trying to find the factors accompanying the

GFD to establish correlations that may allow estimating the number of lightning fatalities over a particular area.

The ultimate goal is to provide guidance about the locations that most need lightning safety measures (oriented to both prevention and protection), in order to promote and enhance lightning risk management in the country.

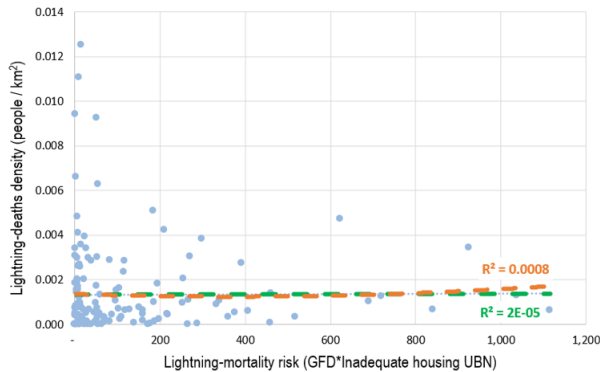


Fig. 7. Lightning-deaths density vs lightning-mortality risk (GFD*Inadequate house UBN indicator).

These preliminary results show that the occurrence of deaths by lightning in Colombia does not follow a proportional trend marked by population density in relation to the ground flash density. Therefore, it is necessary to involve other factors in the study of lightning risk.

Factors like the Unsatisfied Basic Necessities indicators can be considered along with other sociodemographic factors until involving all the possible relevant factors in the analysis, thus determining if there is some way to predict the distribution of lightning fatalities in the country. This is what follows in this research work.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

The Authors wish to thank Vaisala Inc. and its former Senior Scientist, Mr. Ron Holle, for their kindness in supplying the GLD360 lightning data needed for this research project as soon as requested, as well as for solving the questions asked during the process. Certainly, the cooperation agreement is bringing forth good fruit.

REFERENCES

- [1] M. A. Cooper and R. L. Holle, *Reducing Lightning Injuries Worldwide*, 1st ed. Springer Natural Hazards, 2019, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77563-0>
- [2] D. E. Villamil, H. E. Rojas, F. Santamaria, and W. Diaz, "Lightning Risk and Disaster Risk Management at the beginning of the 2020s," 2021, <https://doi.org/10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627393>.
- [3] W. P. Roeder, B. H. Cummins, K. L. Cummins, R. L. Holle, and W. S. Ashley, "Lightning fatality risk map of the contiguous United States," *Nat. Hazards*, vol. 79, no. 3, pp. 1681–1692, 2015, <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1920-6>
- [4] H. J. Christian et al., "Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector," *J. Geophys. Res.*, vol. D1, pp. 4005–4019, 2003, <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>
- [5] D. Aranguren, J. López, J. Inampúes, H. Torres, and H. Betz, "Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 154, pp. 182–189, 2017, ??.

- [6] Departamento Nacional de Planeación República de Colombia - DNP, "Consolidación de la Política Nacional de Información Geográfica y la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales - ICDE," p. 45, 2009, [Online]. Available: <https://www.igac.gov.co/es/ide/estrategia-y-gobierno-geoespacial/politicas> (accessed Jul. 15, 2022)
- [7] Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales - ICDE, *Lineamientos Técnicos para la producción y gestión de Información Geográfica*. 2016.
- [8] J. Ascuntar-Tello and F. Jaimes, "Ronda Clínica y Epidemiológica: Sistemas de Información Geográfica (SIG) en Salud," *Latreia*, vol. 29, no. 1, pp. 97–103, 2016, doi: [10.17533/udea.latreia.v29n1a10.97](https://doi.org/10.17533/udea.latreia.v29n1a10.97)
- [9] D. E. Medina Bernal, "Empleo de Sistemas de Información Geográfica para el Análisis de Problemas Espaciales," *Rev. Ciencia, Innovación y Tecnol.*, vol. III, no. 2017, pp. 7–17, 2017, [Online]. Available: <https://www.jdc.edu.co/revistas/index.php/rciyt/article/view/69>.
- [10] P. I. Arcos González, R. Castro Delgado, and F. del Busto Prado, "Desastres y Salud Pública: Un Abordaje desde el Marco Teórico de la Epidemiología," *Rev. Esp. Salud Publica*, vol. 76, no. 2, pp. 121–132, 2002, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/170/17076206.pdf>.
- [11] Y. Khan, B. Schwartz, and I. Johnson, "Surveillance and Epidemiology in Natural Disasters: A Novel Framework and Assessment of Reliability," *PLoS Curr. Disasters*, vol. 1, no. 6, 2014, <https://doi.org/10.1371/currents.dis.6773eb9d5e64b733ab490f78de346003>
- [12] J. Malilay et al., "The Role of Applied Epidemiology Methods in the Disaster Management Cycle," *Am. J. Public Health*, vol. 104, no. 11, pp. 2092–2102, 2014, <https://doi.org/10.2105/AJPH.2014.302010>
- [13] S. A. Alvarado Bello, "Uso de un Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Amenaza por Inundaciones en la Cuenca Alta del Río Bogotá-Municipio de Cota-Límites Localidad de Suba," *Universidad Católica de Colombia*, 2014.
- [14] United Nations, "Manual de Sistemas de Información Geográfica y Cartografía digital," Naciones Unidas, pp. 1–228, 2000, [Online]. Available: https://unstats.un.org/unsd/publication/SeriesF/SeriesF_79S.pdf.
- [15] D. A. Escobar, S. Cardona, and C. A. Moncada, "Alcance Geoespacial de Atención del Cuerpo de Bomberos. El Caso del Municipio de Manizales en Colombia," *Inf. Tecnológica*, vol. 30, no. 5, pp. 283–290, 2019, <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500283>
- [16] S. Kumar, *Basics of Remote Sensing and GIS*. New Delhi: Laxmi Publications (P) LTD, 2005.
- [17] J. Kumar, K. Kumar, N. Gupta, and V. Kumar, "Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) and Its Application in Various Fields," in *National Conference on Energy and Environment: Threats and Remedies NCEETR 2016*, 2016, pp. 158–178
- [18] D. M. Mach, H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, S. J. Goodman, and W. L. Boeck, "Performance assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 112, no. 09210, pp. 1–16, 2007, <https://doi.org/10.1029/2006JD007787>
- [19] D. J. Cecil, D. E. Buechler, and R. J. Blakeslee, "Gridded Lightning Climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset Description," *Atmos. Res.*, vol. 135–136, no. July, pp. 404–414, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.028>
- [20] A. Nag, M. J. Murphy, W. Schulz, and K. L. Cummins, "Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques," *Earth Sp. Sci.*, vol. 2, no. 4, 2015, <https://doi.org/10.1002/2014EA000051>
- [21] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC, "NTC 4552 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 1: Principios generales," p. 71, 2008.
- [22] International Electrotechnical Commission IEC, IEC 62305 Protection Against Lightning - Part 1: General Principles, 2.0. 2010.
- [23] J. L. Lapiere, M. G. Stock, M. Hoekzema, and S. C. Thangaraj, "Recent improvements in the Earth Networks Lightning Network in Argentina," 2019.
- [24] O. Pinto, I. R. Pinto, M. M. Saba, and K. P. Naccarato, "Cloud-to-Ground Lightning Observations in Brazil," in *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer, Dordrecht, 2009, pp. 209–229.
- [25] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montana, and J. Herrera, "Review of Ground Flash Density and Keraunic Levels Reported in Tropical Regions," *Asia-Pacific International Conference on Lightning APL 2015*, Nagoya, 2015.
- [26] F. Diaz, D. Ortiz, and F. Roman, "Quarterly Analysis of Total Lightning Activity in Colombia," in *2019 International Symposium on Lightning Protection, XV SIPDA*, São Paulo, 2019.
- [27] S. Heckman, C. Liu, and C. Sloop, "Earth Networks Lightning Overview," in *32nd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, 2014, p. 4, <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973433>
- [28] R. Said and M. J. Murphy, "GLD360 Upgrade: Performance Analysis and Applications," *24th International Lightning Detection Conference*, San Diego, California, 2016.

- [29] R. Said, "Towards a global lightning locating system," *Weather*, vol. 72, no. 2, pp. 36–40, 2017, <https://doi.org/10.1002/wea.2952>
- [30] S. D. Rudlosky, M. J. Peterson, and D. T. Kahn, "GLD360 performance relative to TRMM LIS," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1307–1322, 2017, <https://doi.org/10.1175/jtech-d-16-0243.1>
- [31] H. D. Betz, K. Schmidt, and W. P. Oettinger, "LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe," in *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer, Dordrecht, 2009, pp. 115–140.
- [32] Vaisala Inc., "Vaisala Lightning 2016-2021," 2022. <https://interactive-lightning-map.vaisala.com/> (accessed Jul. 15, 2022).
- [33] D. E. Villamil, F. Santamaria, and W. Diaz, *Educación para la Gestión del Riesgo por Descargas Eléctricas Atmosféricas en Colombia*, 1st ed. Bogotá, Colombia: Editorial UD, 2021.
- [34] C. Gomes and A. Gomes, "Lightning Safety Psyche," in 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, 2016, p. 4, <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791427>
- [35] R. L. Holle and R. E. Lopez, "A comparison of current lightning death rates in the U.S. with other locations and times," 2003.
- [36] I. Cardoso, O. Pinto Jr., I. R. C. A. Pinto, and R. L. Holle, "A new approach to estimate the annual number of global lightning fatalities," in 14th International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2011, Rio de Janeiro, 2011.
- [37] R. L. Holle, "The Number of Documented Global Lightning Fatalities," in 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, 2016.
- [38] N. Navarrete, M. A. Cooper, and R. L. Holle, "Lightning Fatalities in Colombia from 2000 to 2009," *Nat. Hazards*, vol. 74, no. 3, pp. 1349–1362, <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1254-9>
- [39] A. S. Cruz-Bernal, H. Torres, D. Aranguren, and J. Inampué, "Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 - 2014," *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 65–74, 2018, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018006>.
- [40] C. Cruz, E. Renteria, and F. Román, "Statistics of the Colombian National Army lightning accidents," 2013, <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729181>.
- [41] ANDA - DANE, "Vital Statistics," 2022. http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/MICRODATOS/about_collection/22/5 (accessed Jun. 30, 2022).
- [42] J. Ramírez and J. Aguas, *Configuración territorial de las provincias de Colombia*. Naciones Unidas, 2022.
- [43] X. Mancero and J. C. Feres, *El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina*, vol. 8, no. 7. Naciones Unidas, 2001.
- [44] DANE, "Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)," 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi> (accessed Jul. 30, 2022).
- [45] D. E. Villamil, N. Navarrete, and M. A. Cooper, "Keraunoparalysis and burning thatch: A proposed explanation for severe lightning injuries reported in developing countries," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 197, no. 107301, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107301>

Meta-modelo de Ciberseguridad con Blockchain para IoT

Julio Cesar Rodríguez Molano

Abstract—El hackeo a los dispositivos IOT aumenta a medida que transcurre el tiempo, y es que acceder a estos, no suele ser muy difícil, ya que la seguridad que algunos tienen es, o de muy baja calidad o nula. Lo más delicado es cuando en este ataque se compromete información confidencial, daños a la infraestructura, bases de datos, etc., esto afecta el core del negocio, y podría llevarlos incluso a la quiebra. Por esto la ciberseguridad se ha vuelto un factor fundamental para la protección de la infraestructura computacional y todo lo relacionado de esta, especialmente la información que circula en la red, en esta tesis doctoral se pretende acercar al público en general al mundo del internet de las cosas, la ciberseguridad y sus avances en la protección de los dispositivos IoT, Blockchain y su aporte en el mejoramiento de la ciberseguridad, así mismo proponer una posible solución a problemas de seguridad en los sistemas IoT, específicamente los relacionados con la autenticación, autoridad y procedencia de los datos, por medio de la integración de elementos de ciberseguridad y Blockchain como tecnología facilitadora en el campo de IoT para reforzar y dar solución a problemas de seguridad gracias a sus ventajas diferenciadoras.

Palabras clave—Blockchain, Internet of Things, Smart-Contract, Security, identity, Raspberry Pi.

I. INTRODUCCION

DESDE esde el surgimiento del Internet de las Cosas (Internet of Things- IoT) [1], [2] y su posterior desarrollo, en la última década [3], las aplicaciones y proyecciones de usabilidad se han mantenido en un crecimiento exponencial y los resultados han superado todas las expectativas. Si bien, inicialmente IoT fue definido como la interconexión de objetos conectados a Internet con capacidad de comunicarse y ser parte de las capacidades tecnológicas de las organizaciones, hoy se han alcanzado niveles de productividad e innovación cada vez más acelerados [4]. En consecuencia, con el objetivo principal del IoT de expandir las comunicaciones existentes persona-persona hacia comunicaciones persona-cosa y cosa-cosa conectando el mundo físico y el mundo virtual [5], se generó una demanda de dispositivos con estas características, que trajo consigo la integración de diferentes sectores productivos y de servicios que hacen que esta tecnología presente un panorama de crecimiento aun mayor del esperado, hasta considerar el número de dispositivos IoT conectados un crecimiento desde 3750 millones de dispositivos conectados en 2014 con una previsión de 14.76 billones a 2024 [6]. Esta evolución de IoT, que inició como una red de objetos físicos y que se ha convertido en una red de ordenadores y dispositivos de todo tipo y tamaño (vehículos, teléfonos inteligentes, electrodomésticos, juguetes, cámaras, instrumentos médicos y sistemas industriales, animales, personas, edificios, etc.) [3], [7] ha permitido que miles de millones de objetos

puedan percibir, comunicar y compartir información, todos ellos interconectados en redes públicas o privadas a través de un Protocolo de Internet (IP) y que haya generado el desarrollo de otras tecnologías que facilitan y mejoran su interoperabilidad, confiabilidad, seguridad e integración a diferentes niveles tecnológicos de bienes y servicios [2]. El IoT está en auge, su capacidad y aplicación aumenta en conjunto a diversas tecnologías como la computación en la nube, la robótica, las mejoras en infraestructura de comunicaciones, la aplicación de Big Data para el procesamiento de grandes volúmenes de datos, la Inteligencia artificial y Blockchain [8], [9].

Al IoT, se suman las cadenas de bloques o Blockchain, el cual transforma la forma en que se intercambia valor. El Blockchain surgió en 2008, como una propuesta realizada por Satoshi Nakamoto [10], esta propuesta reemplazó el modelo centralizado por uno descentralizado, donde el poder de decisión sobre el sistema se delegó directamente en los usuarios de la cadena de bloques y se materializó inicialmente en un protocolo denominado Bitcoin que implementaba las reglas de operación de un sistema de gestión de efectivo digital de manera descentralizada sin la necesidad de nodos centrales que lo controlaran o lo regularan [10]. Sin embargo, las técnicas basadas en Blockchain se han independizado y evolucionado del Bitcoin, siendo aplicables a muchos campos que van más allá de la moneda, las finanzas y los mercados, es vista como una innovación técnica y económica [11]–[13] particularmente en las áreas de gobierno, salud, ciencia, alfabetización, cultura y arte. La tecnología Blockchain se identifica como factor clave en la resolución de problemas de escalabilidad, privacidad y confiabilidad relacionados directamente con el paradigma de IoT [14], [15].

Blockchain permite la creación de redes más seguras, en las que los dispositivos IoT se interconectan de forma confiable, evitando amenazas como la falsificación de dispositivos al asignar identificadores únicos a los distintos objetos inteligentes, de forma que se incremente la seguridad respecto a posibles ataques de suplantación de identidad, debido a que se conservan atributos de IoT [16], [17]. Blockchain como tecnología facilitadora de IoT especialmente útil cuando se trata de garantizar la protección de la identidad, de los datos, de las infraestructuras y trazabilidad del flujo de la información, lo que permite revisar el flujo de la data y los cambios [18].

En este orden de ideas, otros aspectos importantes son la escalabilidad y seguridad, en un entorno IoT la escalabilidad tiene un impacto importante ya que surgen nuevos sensores que requieren parte de procesamiento Cloud generalmente en servidores bajo demanda, en donde el principal reto de la

escalabilidad es la escalabilidad software y la capacidad de los sistemas para procesar un gran conjunto de datos en tiempo real y apoyados en Big Data para resolver esta problemática [19], [20]. En cuanto a la seguridad, para diseñar un sistema seguro es importante identificar las personas o entidades que participan y su acceso, los datos a proteger, las comunicaciones y el hardware implicado en el sistema. Todo esto no cambia, aunque se trate de un ecosistema IoT, las personas interactúan tanto con la aplicación como con los dispositivos y estos recogen información sensible del entorno [21], [22].

Según el Instituto Nacional de Ciberseguridad español [23], las vulnerabilidades más comunes registradas en sistemas IoT tenían como referencia Uso de contraseñas débiles o embebidas, servicios de red inseguros, interfaces inseguras en el ecosistema IoT, falta de mecanismos de actualización seguros, uso de componentes inseguros o desactualizados, insuficiente protección de la privacidad, falta de seguridad en el almacenamiento y transferencia de datos, inadecuada gestión de dispositivos, configuraciones por defecto inseguras y la falta de bastionado físico [24].

El auge de los dispositivos IoT y su aplicación en todos los niveles de la generación y digitalización de bienes y servicios, ha hecho que sean un objetivo para los ciberdelincuentes [21][22]. Desde que su uso se masificó en la Industria 4.0 [25] y se extendió a los demás sectores de la economía[26], estos dispositivos se han convertido en punto de entrada de los ciberdelincuentes a las redes de la organización y al aprovechamiento de sus recursos, provocando consecuencias graves para la seguridad de las organizaciones [14], [28]. La conectividad a Internet es la principal característica de los diferentes dispositivos IoT, pero también su actual punto débil. Las fallas en seguridad de los dispositivos IoT, pone en riesgo la seguridad de los usuarios y su privacidad, toda vez que los mismos gestionan volúmenes de información confidencial empresarial y personal. Estos dispositivos en la actualidad y en ocasión a la pandemia de Covid19, ha permitido que los ciberdelincuentes los utilicen para controlar otros sistemas y dispositivos a través de envío de spam, lanzamiento de ataques de denegación distribuida de servicio o DDoS, distribución de malware, etc [29][30].

Por ello, integrar elementos de ciberseguridad y Blockchain para dispositivos y aplicaciones IoT [31], [32], permitirá resolver esas inquietudes y preocupaciones de las organizaciones y usuarios de dispositivos IoT sobre la privacidad y confidencialidad de sus datos y el uso de la información generada por el procesamiento de los mismos [33], [34]. De igual forma, es necesario enunciar que en ingeniería se usan los modelos como elementos esenciales para comprender sistemas complejos del mundo real. La Ingeniería dirigida por modelos (Model-Driven Engineering, MDE) [35], [36], juega un papel imprescindible en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, por cuanto pretende dar solución al problema de las plataformas cambiantes en las empresas que asumen el uso de sistemas informáticos, la interoperabilidad y la portabilidad de los mismos y su uso permite reducir la complejidad del desarrollo de software automatizando tareas y procesos, logrando así software más fiable y con funcionalidades más sofisticadas [37]. Adicionalmente, la ingeniería dirigida por modelos (MDE,

Model-Driven Engineering) ofrece garantías de reusabilidad de código e interoperabilidad entre aplicaciones, lo que implica la posibilidad de poder reutilizar ciertas partes o ciertos lenguajes de dominio específico para crear un desarrollo confiable, de calidad y automatizable [38], [39].

Para el caso de estudio, la IoT y la tecnología Blockchain requieren reconocer los objetos inteligentes, mantener un flujo de mensajes y de instrucciones entre los diferentes objetos. Sin embargo, cada implementación puede presentar diferentes problemas y cada aplicación proporciona una solución diferente [40], [41]. Una solución para estos casos es realizar una arquitectura que soporte el paso de mensajes de los diferentes tipos de dispositivo y sea capaz de responderles, a partir de aproximaciones mediante MDE, con la cual se propone la creación de aplicaciones que permitan interconectar objetos [42].

Es por esto por lo que nos podríamos plantear diferentes interrogantes acerca de los sistemas IoT en la actualidad, ¿Son seguros? ¿Se aprovechan todos los datos recolectados? ¿Qué ocurre cuando se pierde la conexión? ¿Qué problemas de compatibilidad se presentan? ¿Hasta qué punto son escalables? ¿Su punto más vulnerable es la aplicación?

En resumen, en esta tesis doctoral se pretende acercar al público en general al mundo del internet de las cosas, la ciberseguridad y sus avances en la protección de los dispositivos IoT, Blockchain y su aporte en el mejoramiento de la ciberseguridad, así mismo proponer una posible solución a problemas de seguridad en los sistemas IoT, específicamente los relacionados con la autenticación, autoridad y procedencia de los datos, por medio de la integración de elementos de ciberseguridad y Blockchain como tecnología facilitadora en el campo de IoT para reforzar y dar solución a problemas de seguridad gracias a sus ventajas diferenciadoras.

En esta tesis doctoral se pretende proponer un Meta-modelo de integración de la tecnología Blockchain y ciberseguridad para ecosistemas IoT, que permita abordar y resolver el problema de la autenticación en entornos IoT, basado en el uso de SmartContracts con el propósito de administrar de forma segura la identificación de los dispositivos de manera descentralizada. Se parte con la certeza que se puede utilizar un SmartContract para administrar el sistema de forma segura y escalable. Se realizarán pruebas de seguridad y se monitorizará el rendimiento de la propuesta comparándola con respecto a otros sistemas que aplican Blockchain para casos de uso similares.

II. CIBERSEGURIDAD, BLOCKCHAIN AND SMARTCONTRACT

Es fácil confundirse entre los términos, ciberseguridad y seguridad informática, la ciberseguridad comúnmente se puede asociar con palabras iniciadas con “ciber”, como ciberespacio, ciberamenaza, cibercriminales u otros más. Pero regularmente es tomado como un sinónimo de seguridad informática y pues no es del todo cierto. Según una definición de Eset, la ciberseguridad busca proteger la información digital en los sistemas interconectado. Está comprendida dentro de la seguridad de la información. [43]. Por esto es importante

aclearar los dos términos con una definición acertada evitando así una confusión cuando se tiene que aplicar y expresar de manera correcta estos dos términos, si bien existen muchas definiciones de ciberseguridad y de seguridad informática. La ciberseguridad es la práctica de defender con tecnologías o practicas ofensivas, las computadoras, los servidores, los dispositivos móviles, los sistemas electrónicos, las redes y los datos de ataques maliciosos. La seguridad de la información es el conjunto de medidas preventivas y reactivas que afectan al tratamiento de los datos almacenados y que permiten almacenar y proteger la información. [45] La tecnología Blockchain y los registros globales distribuidos están atrayendo una atención masiva y se están aplicando en múltiples proyectos y en diferentes casos de uso para diferentes industrias [47]. En esencia, Blockchain es un libro mayor compartido e inmutable diferente a una base de datos capaz de almacenar una lista de entradas, a las que llamamos bloques. En este libro se implementan mecanismos criptográficos que impiden a los interesados alterar su contenido. Cada bloque en Blockchain está relacionado por una función hash. Para cada bloque, se generará un hash que representa su contenido y se almacenará el hash del bloque anterior [48].

Cada bloque almacenará las transacciones, los datos de la aplicación (como en un libro). Otro aspecto que queremos destacar es el concepto de SmartContract, el cual es un contrato que se hace cumplir entre cualquier operación que se produzca en la Blockchain. Este es un elemento esencial para desplegar código de forma totalmente escalable y distributiva. Existen dos tipos de contratos inteligentes, deterministas y no deterministas [49]. Un SmartContract determinista es aquel que no requiere ninguna información de una parte externa (servicio externo al OC). Un no determinista es el que depende de la información de una fuente externa

III. ESTADO DEL ARTE

La implementación de Blockchain en el campo de IoT no es algo relativamente nuevo. Se puede encontrar en documentos oficiales diferentes enfoques con la tecnología Blockchain para mejorar la seguridad de los sistemas IoT. Un caso de uso común es la aplicación de estas soluciones en un SmartHome [50]. Cada SmartHome estaría equipado con un dispositivo conectado a Internet que actuaría como minero, encargado de gestionar todas las comunicaciones externas e internas de los dispositivos conectados a la Blockchain. Esto se aplicaría de manera similar a nuestra propuesta en la que los servidores que alojan Blockchain actuarían como un minero para gestionar las comunicaciones. El minero es una parte clave y crítica del sistema siendo un elemento susceptible de ser atacado por un atacante externo. Un aspecto importante de la seguridad como hemos mencionado es la gestión de la identidad digital. El sistema propuesto en [51] se aplica como ejemplo en un caso práctico de una compañía telefónica. En la propuesta interactúan tres actores, el usuario final, el proveedor del servicio IDaas y un cliente del servicio IDaas proveedor de servicios. En la propuesta se mantiene una blockchain privada y el socio solo tiene permisos de lectura en la blockchain. Para la autenticación, el sistema verifica la identificación del

usuario virtual en la cadena de bloques y se le otorga una clave pública al usuario virtual cuando desea acceder a los servicios. En nuestro caso, se genera un UUID descentralizado para los dispositivos. Una tecnología fundamental en la seguridad de los sistemas es el control de acceso. En [52] se propone ABAC (control de acceso basado en atributos) como un método para asegurar el acceso a dispositivos y el uso de Blockchain. ABAC, en lugar de utilizar el enfoque tradicional basado en roles o en listas, basa el acceso al dispositivo en un conjunto de atributos en los dispositivos. Blockchain se utiliza para almacenar la distribución de estos atributos. Se mantienen con un conjunto de transacciones de forma inmutable.

Al igual que lo anterior en [53] se propone otra solución para controlar el acceso a los datos almacenados en la plataforma IoT utilizando varias cadenas de bloques. La arquitectura se divide en 4 Blockchains diferentes (una Blockchain de Contexto, una Blockchain de Relación, una Blockchain de Reglas y una Blockchain de Responsabilidad). En la solución se combina la comunicación entre las Blockchains para realizar el control de acceso. Otro aspecto importante de la seguridad es la privacidad de los datos. La propuesta presentada en [54] tiene como objetivo garantizar la privacidad y seguridad de los datos sensibles a través del cifrado de datos. Se propone encriptar los datos en base a un conjunto de atributos dados por varias autoridades certificadas.

Un aspecto común en todas las soluciones es la computación en la nube. Los sistemas en la nube hoy en día pueden ofrecerse como servicios desde la nube sin que el consumidor de los servicios tenga que gastar esfuerzos en infraestructura. Junto con la computación en la nube y el bajo costo de los dispositivos IoT, esto facilita la implementación de redes de dispositivos que utilizan servicios externos. El proveedor de la plataforma IoT deberá respaldar la escalabilidad y la seguridad del sistema.

IV. PLATAFORMA IOT CON BLOCKCHAIN PROPUESTA

La plataforma a proponer deberá permitir la administración de diversos dispositivos de forma descentralizada, distribuida y segura. Abarcando el ciclo de vida completo de los dispositivos, desde la creación de sus identidades digitales, gestión de su conexión, acceso, información, configuración y persistencia de los datos que suben a los repositorios de información designados. Las plataformas IoT convencionales y más extendidas almacenan datos en la Nube. En nuestro caso, utilizaremos la tecnología Blockchain para persistir los datos que se manipulan en la plataforma y se utilizarán SmartContracts para todas las funcionalidades de Blockchain.

En este primer acercamiento en la plataforma IoT se propone el módulo de seguridad de la plataforma para mantener la identificación de los dispositivos de forma segura sin que un posible atacante pueda usurpar la identidad de uno de los dispositivos y modificar su información. Para el caso de estudio tendremos dos actores principales que serán dos organizaciones diferentes. La organización 1, que será la consumidora del servicio. El otro actor principal es la organización 2, que ofrece los servicios de la plataforma IoT.

En uno o más servidores se expone una red Blockchain donde la Organización 1 podrá registrar sus dispositivos y administrar las identidades de los dispositivos a través de transacciones de la Organización 1 que se envían por el canal a la Organización 2 a través del SmartContract. El sistema se segmentará en:

- Red blockchain donde se almacenan los datos de los dispositivos IoT.
- SmartContract que expone las operaciones disponibles para manipular la información de los dispositivos IoT.
- Servicio integrable (API) en la futura plataforma que expone las operaciones del SmartContract, permitiendo la inclusión de una capa adicional de seguridad en caso de ser necesario.

Para el caso de estudio también se incluirá una aplicación cliente que utiliza la organización 1, que se implementará en Raspberry Pi 4 y consumirá los servicios expuestos por la API implementada en el servidor. La red Blockchain se desplegará en contenedores Docker, uno por cada uno de los nodos que la forman (uno por cada nodo Peer, cada nodo de gestión de red y un nodo por cada autoridad de certificación).

A. USO E IMPLEMENTACION DE BLOCKCHAIN PARA EL CASO DE ESTUDIO

Se utilizará Hyperledger Fabric (Fabric) para la implementación de la red Blockchain. Fabric es una plataforma de código abierto para desplegar redes Blockchain privadas donde los participantes (organizaciones) de la red son conocidos y por lo tanto se asume un cierto grado de confianza. Fabric tiene la particularidad de poder crear subredes (canales) a las que solo pueden acceder los participantes de la red invitados. Se utilizará un solo canal con los dos participantes. El acceso a la información se configura en base a estos canales y solo las organizaciones con sus certificados asociados al canal tendrán acceso a los datos publicados. Ambas organizaciones podrán operar en la red y específicamente en este canal. De esta forma, a medida que se realicen operaciones de datos, se generarán transacciones y, a su vez, se generarán bloques en esta subred protegida de cualquier otro uso de la propia red Fabric. Esto proporciona un alto nivel de privacidad de datos; una organización fuera del canal y sin certificados válidos tendrá datos cifrados y, por lo tanto, podrá acceder a los datos sin permiso. También se debe recordar que todas las transacciones son firmadas por la organización emisora para que su identidad pueda ser verificada y aceptada en la red, esta parte será transparente para el usuario cliente ya que utilizará una identidad de la organización y el usuario correspondiente en el nivel de aplicación.

El SmartContract actuará como middleware para solicitudes externas de intercambio de datos entre actores que deseen intercambiar información. Para la implementación de un SmartContract, se deben considerar varias cuestiones. Un SmartContract será accesible para cualquier persona que tenga acceso al canal o red donde esté desplegado. A nivel de programación hay que tener cuidado tanto con la funcionalidad que se está exponiendo como con las validaciones necesarias sobre los datos y los estados de los objetos para permitir o no ciertas operaciones. Si las operaciones no están debidamente

validadas, crearíamos un agujero de seguridad que podría poner en peligro los datos en caso de usurpación de la identidad de un usuario de la aplicación. Una buena práctica en la implementación de un SmartContract es implementar solo lo que se necesita, cuanto más código implementemos y expongamos al mundo exterior, más fácil será que ocurra un error y sea explotable por un atacante [42].

Para nuestro caso de estudio permitiremos tres operaciones diferentes sobre los objetos:

- Registrar un UUID en el CB. La generación de UUID se descentralizará y las aplicaciones cliente generarán los UUID. Se comprobará que el UUID dado sea único para todo el CB.
- Asociar un UUID a un dispositivo físico con sus características. En este punto asociaremos el UUID a un dispositivo, dada la inmutabilidad del BC será imposible usurpar el UUID en este punto. Una vez realizada esta asociación, el sistema puede garantizar que la identificación de un dispositivo está garantizada.
- Cuando se cancela el registro de un dispositivo, el dispositivo se marcará como cancelado, pero no se eliminará ni su UUID ni su información. El UUID será como un documento de identidad del dispositivo, nunca se desvinculará.

Se incorporarán medidas básicas de seguridad a nivel de aplicación y servicio. El sistema incluirá un sistema de autenticación, roles para controlar las operaciones y un token de acceso temporal para todas las solicitudes. A nivel de aplicación, un atacante que intente acceder al sistema no podrá hacerlo si no tiene un usuario válido o el token para incluir en las solicitudes. Como se presentó anteriormente a nivel de red, una organización externa corrupta que no esté certificada y validada en la red no podrá acceder al SmartContract. Tampoco podrá leer la información incluida dentro del canal del sistema.

A nivel de SmartContract, se aplica el ciclo de vida predeterminado. Esto solo permitirá que las operaciones en los objetos del dispositivo se inicien de manera segura. Por ejemplo, en caso de que desee registrar la información de un dispositivo en un UUID, no debe estar relacionado con ningún otro dispositivo. Una característica mencionada anteriormente es la inmutabilidad. Un BC es inmutable por lo que cualquier cambio realizado por el SmartContract será imperativo en el BC. Al controlar el ciclo de vida, permitiremos que las aplicaciones cliente solo se rijan por los estados que nos interesan y evitaremos comportamientos inesperados.

B. SIMULACION DE ATAQUE

Para la realización de la prueba del sistema se realizarán una serie de comportamientos maliciosos y estudiaremos cómo responde el sistema. El objetivo del atacante será usurpar la identidad de un dispositivo que ya está en la red modificando su información. Los comportamientos maliciosos son:

- 1) Un atacante externo identifica el servicio e intenta acceder a sus funcionalidades. El sistema requiere un token que se valida con las credenciales de la organización. Un

usuario sin credenciales de acceso no podrá generar un token y por lo tanto acceder a las funciones del sistema.

- 2) Hipotéticamente, un atacante tiene acceso a uno de los nodos de la red y quiere acceder al CB. Sin tener los certificados ni ninguna identidad de la organización, los datos estarán encriptados y no legibles.
- 3) Un atacante accede a la aplicación cliente desde la computadora de un usuario a través de un programa externo. Varios escenarios son posibles en este caso.
 - a) Accede a una cuenta administrativa y solo tiene permisos de lectura. En este caso, solo podrá ver los dispositivos en la red.
 - b) Accede a una cuenta con permisos para crear y/o vincular dispositivos físicos. En este caso el SmartContract juega un papel fundamental. Aunque el atacante haya usurpado el control de la aplicación, las operaciones deben cumplir con lo definido en este SmartContract. De esta forma, solo se permite lo definido en el SmartContract y no se permite la modificación o usurpación malintencionada de un dispositivo. Una vez que se asigna un dispositivo a un UUID, no se puede desvincular. Incluso si un dispositivo se desvincula con éxito, no será posible asignar otro dispositivo al UUID reservado. Esto no estaría garantizado en una base de datos tradicional.
- 4) Un aspecto importante en las redes privadas Blockchain es la securitización de los nodos y servidores sobre los cuales se van a desplegar los nodos de la red BC. Combinado con la gran cantidad de nodos virtuales que se pueden formar para una red BC. Un atacante puede escanear uno de los nodos con herramientas como Nmap y apoderarse de uno de los servicios y ejecutar un exploit. Es importante asegurar los nodos con un firewall, listas blancas, herramientas como fail2ban, etc.
- 5) Para esta propuesta no se ha considerado una protección especializada contra ataques DDOS. Para este prototipo, confiamos en ddos-deflate [55], que puede ser útil para detectar y proteger contra este tipo de ataques

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La clave principal de la propuesta es el SmartContract. Este controlará todo el ciclo de vida de los objetos y gracias a la inmutabilidad y trazabilidad del BC nos permitirá garantizar el estado de los objetos. De esta forma demostramos cómo a partir de un UUID generado de forma descentralizada podemos garantizar el control sobre la identidad de los dispositivos. Esto nos permitirá delegar la creación de identidades a las aplicaciones cliente para que podamos escalar el sistema más fácilmente. Por lo tanto, no habrá un sistema central con la responsabilidad de generar las identidades y podría causar un cuello de botella.

A. MEDICION DE DATOS

El sistema se ejecutará en una máquina virtual con Ubuntu 20.04.01 LTS con 8GB de RAM en un host Windows 10

B. RESULTADOS

Una característica de la implementación de las herramientas Blockchain son los tiempos de carga, que muchas veces pueden ser más largos que el uso de bases de datos tradicionales. Para comparar con otros sistemas de similares características nos basaremos en los datos reproducidos en los estudios [49] y [56].

Los retrasos causados por el SmartContract serán medidos según el tiempo empleado para cada uno de los 3 tipos de operaciones (creación de un dispositivo, enlace/alta con un dispositivo físico y baja) se han tomado varias mediciones, promediado todas las operaciones.

C. DISCUSIONES

Se es consciente que BC es computacionalmente costoso, tiene una escalabilidad limitada y, posiblemente el rendimiento se puede ver afectado. Además que el proceso puede ser más costoso penalizando el rendimiento de la solución.

VI. CONCLUSIONES

Nuestra propuesta garantiza la seguridad de la identidad de un dispositivo a través de SmartContracts. Esta investigación demuestra cómo se puede utilizar un SmartContract para controlar el ciclo de vida de un dispositivo. El SmartContract y la inmutabilidad del BC garantizan la seguridad de la identidad de los dispositivos en la red. Nuestra propuesta garantiza la robustez del sistema utilizando UUID descentralizados asegurando la escalabilidad. Aplicar un BC basado en Hyperledger Fabric nos aporta una capa extra de seguridad a nivel de participantes o usuarios de la red. Y cualquier nodo externo no permitido dentro de la propia red no podrá ver los datos cifrados ni utilizar el SmartContract definido.

Como hemos discutido, BC y SmartContracts son computacionalmente costosos y afectan el rendimiento de la aplicación. Sin embargo, las ganancias de seguridad superan las pérdidas de rendimiento. Una brecha de seguridad puede significar millones de dólares en pérdidas

REFERENCIAS

- [1] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [2] P. P. Ray, "A survey on Internet of Things architectures," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 30, no. 3, 2018, doi: 10.1016/j.jksuci.2016.10.003.
- [3] H. HaddadPajouh, A. Dehghantanha, R. M. Parizi, M. Aledhari, and H. Karimipour, "A survey on internet of things security: Requirements, challenges, and solutions," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 14, 2021, doi: 10.1016/j.iot.2019.100129.
- [4] X. Li and L. Da Xu, "A Review of Internet of Things - Resource Allocation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3035542.
- [5] L. Lao, Z. Li, S. Hou, B. Xiao, S. Guo, and Y. Yang, "A survey of IoT applications in blockchain systems: Architecture, consensus, and traffic modeling," *ACM Comput. Surv.*, vol. 53, no. 1, 2020, doi: 10.1145/3372136.
- [6] "• IoT connected devices worldwide 2019-2030 | Statista." <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/> (accessed Mar. 21, 2022).
- [7] M. Humayun, N. Z. Jhanjhi, A. Alsayat, and V. Ponnusamy, "Internet of things and ransomware: Evolution, mitigation and prevention," *Egyptian Informatics Journal*, vol. 22, no. 1, 2021, doi: 10.1016/j.eij.2020.05.003.

- [8] H. F. Atlam, M. A. Azad, A. G. Alzahrani, and G. Wills, "A review of blockchain in internet of things and Ai," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 4, no. 4, 2020, doi: 10.3390/bdcc4040028.
- [9] T. Alam and M. Benaïda, "Blockchain and internet of things in higher education," *Univers. J. Educ. Res.*, vol. 8, no. 5, 2020, doi: 10.13189/ujer.2020.080556.
- [10] S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System Nakamoto, S. (2008).," *J. Gen. Philos. Sci.*, vol. 39, no. 1, 2008.
- [11] D. Macrinici, C. Cartoceanu, and S. Gao, "Smart contract applications within blockchain technology: A systematic mapping study," *Telemat. Informatics*, vol. 35, no. 8, pp. 2337–2354, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.TELE.2018.10.004.
- [12] A. Dixit, V. Deval, V. Dwivedi, A. Norta, and D. Draheim, "Towards user-centered and legally relevant smart-contract development: A systematic literature review," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 26, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jii.2021.100314.
- [13] A. A. Hervani, S. Nandi, M. M. Helms, and J. Sarkis, "A performance measurement framework for socially sustainable and resilient supply chains using environmental goods valuation methods," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 30, pp. 31–52, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2021.11.026.
- [14] Q. Wang, X. Zhu, Y. Ni, L. Gu, and H. Zhu, "Blockchain for the IoT and industrial IoT: A review," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 10, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.IOT.2019.100081.
- [15] A. Pal, C. K. Tiwari, and N. Haldar, "Blockchain for business management: Applications, challenges and potentials," *J. High Technol. Manag. Res.*, vol. 32, no. 2, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.hitech.2021.100414.
- [16] D. Minoli and B. Occhiogrosso, "Blockchain mechanisms for IoT security," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 1–2, pp. 1–13, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.IOT.2018.05.002.
- [17] P. I. Radoglou Grammatikis, P. G. Sarigiannidis, and I. D. Moscholios, "Securing the Internet of Things: Challenges, threats and solutions," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 5, pp. 41–70, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.IOT.2018.11.003.
- [18] B. K. Mohanta, D. Jena, S. S. Panda, and S. Sobhanayak, "Blockchain technology: A survey on applications and security privacy Challenges," *Internet of Things*, vol. 8, p. 100107, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.IOT.2019.100107.
- [19] N. Deepa et al., "A survey on blockchain for big data: Approaches, opportunities, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 131, pp. 209–226, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.FUTURE.2022.01.017.
- [20] L. Chen, Q. Fu, Y. Mu, L. Zeng, F. Rezaeibagha, and M. S. Hwang, "Blockchainbased random auditor committee for integrity verification," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 131, pp. 183–193, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.future.2022.01.019.
- [21] Y. I. Alzoubi, A. Al-Ahmad, and H. Kahtan, "Blockchain technology as a Fog computing security and privacy solution: An overview," *Comput. Commun.*, vol. 182, pp. 129–152, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.comcom.2021.11.005.
- [22] M. Gimenez-Aguilar, J. M. de Fuentes, L. Gonzalez-Manzano, and D. Arroyo, "Achieving cybersecurity in blockchain-based systems: A survey," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 124, pp. 91–118, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.future.2021.05.007.
- [23] "Herramientas de ciberseguridad | INCIBE," <https://www.incibe.es/protege-tuempresa/herramientas> (accessed Mar. 22, 2022).
- [24] "Temáticas IoT | INCIBE," <https://www.incibe.es/protege-tuempresa/tematicas/iot> (accessed Mar. 22, 2022).
- [25] P. K. Malik et al., "Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art," *Comput. Commun.*, vol. 166, 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2020.11.016.
- [26] S. Fe, "Industria 4.0. Oportunidades y desafíos para el desarrollo productivo de la provincia de Santa Fe." Accessed: Mar. 20, 2021.
- [27] . Available: www.cepal.org/apps.
- [28] X. Li, P. Jiang, T. Chen, X. Luo, and Q. Wen, "A survey on the security of blockchain systems," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 107, pp. 841–853, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.FUTURE.2017.08.020.
- [29] R. P. Singh, M. Javaid, A. Haleem, and R. Suman, "Internet of things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic," *Diabetes Metab. Syndr. Clin. Res. Rev.*, vol. 14, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.dsx.2020.04.041.
- [30] Q. Wang, X. Zhu, Y. Ni, L. Gu, and H. Zhu, "Blockchain for the IoT and industrial IoT: A review," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 10, no. 66, 2020, doi: 10.1016/j.iot.2019.100081.
- [31] A. Bicaku, M. Tauber, and J. Delsing, "Security standard compliance and continuous verification for Industrial Internet of Things," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 16, no. 6, 2020, doi: 10.1177/1550147720922731.
- [32] Rachit, S. Bhatt, and P. R. Ragiri, "Security trends in Internet of Things: a survey," *SN Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04156-9.
- [33] G. Roldán-Molina, M. Almache-Cueva, C. Silva-Rabadão, I. Yevseyeva, and V. Basto-Fernandes, "A Comparison of Cybersecurity Risk Analysis Tools," in *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 121, doi: 10.1016/j.procs.2017.11.075.
- [34] L. A. Flores-Montañó, J. C. Herrera-Lozada, J. Sandoval-Gutiérrez, R. VázquezLópez, and D. L. Martínez-Vázquez, "Cibersecurity on internet of robotics things: Experimental platform," *Dyna*, 2021, doi: 10.15420/USC.2021.02.
- [35] S. Kent, "Model driven engineering," 2002, doi: 10.1007/3-540-47884-1_16.
- [36] D. Gašević, D. Djurić, and V. Devedžić, *Model driven engineering and ontology development*. 2009.
- [37] P. Por et al., "MODELADO ESPECIFICO DE DOMINIO PARA LA CONTRUCCION DE LEARNING OBJECTS INDEPENDIENTES DE LA PLATAFORMA' Para la obtención del título de Doctor en Informática," 2011.
- [38] C. Gonzalez Garca, D. Meana-Llorin, B. C. Pelayo G-Bustelo, J. M. Cueva Lovelle, and N. Garcia-Fernandez, "Midgar," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, 2017.
- [39] J. Heering, M. Mernik, and A. M. Sloane, "Domain-specific languages," *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS 2003*. 2003, doi: 10.1109/HICSS.2003.1174888.
- [40] J. Sun, J. Yan, and K. Z. K. Zhang, "Blockchain-based sharing services: What blockchain technology can contribute to smart cities," *Financ. Innov.*, vol. 2, no. 1, 2016, doi: 10.1186/s40854-016-0040-y.
- [41] A. Pieroni, N. Scarpato, L. Di Nunzio, F. Fallucchi, and M. Raso, "Smarter City: Smart energy grid based on Blockchain technology," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 8, no. 1, 2018, doi: 10.18517/ija-seit.8.1.4954.
- [42] D. Meana-Llorián, C. G. García, J. P. Espada, M. Khari, and V. B. Semwal, "Bilrost: Connecting the Internet of Things through human Social Networks with a DomainSpecific Language," 2017, doi: 10.15439/2017r110.
- [43] Eset, "We live Security," Miguel Angel Mendoza, 16 06 2015.
- [44] . Available: <https://www.welivesecurity.com/las-es/2015/06/16/ciberseguridad-seguridad-informacion-diferencia/>.
- [45] LISA Institute, "Diferencia entre Ciberseguridad, Seguridad Informática y Seguridad de la Información," 3 03 2021.
- [46] . Available: <https://www.lisainstitute.com/blogs/blog/diferencia-ciberseguridad-seguridad-informatica-seguridad-informacion/>.
- [47] CROSBY, Michael, et al. "Blockchain technology: Beyond bitcoin". *Applied Innovation*, 2016, vol. 2, no 6-10, p. 71.
- [48] MORABITO, Vincenzo. "Smart contracts and licensing". In *Business Innovation Through Blockchain*. Springer, Cham, 2017. p. 101124.
- [49] DORRI, Ali, et al. "Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home". 2017 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PerCom workshops). IEEE, 2017. p. 618-623, doi: 10.1109/PERCOMW.2017.7917634.
- [50] Lee, J. H. (2017). "BIDaaS: Blockchain based ID as a service". *IEEE Access*, 6, 2274-2278. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2782733.
- [51] DING, Sheng, et al. "A novel attribute-based access control scheme using blockchain for IoT". *IEEE Access*, 2019, vol. 7, p. 3843138441, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2905846.
- [52] PINNO, Otto Julio Ahlert; GREGIO, Andre Ricardo Abed; DE BONA, Luis CE. "Controlchain: Blockchain as a central enabler for access control authorizations in the iot". *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. IEEE*, 2017. p. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254521.
- [53] RAHULAMATHAVAN, Yogachandran, et al. "Privacy-preserving blockchain based IoT ecosystem using attribute-based encryption". In *2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. IEEE, 2017. p. 1-6, doi: 10.1109/ANTS.2017.8384164.
- [54] Zaf DoS Deflate <https://github.com/jgmdev/ddos-deflate>
- [55] DORRI, Ali, et al. LSB: "A Lightweight Scalable Blockchain for IoT security and anonymity". *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2019, vol. 134, p. 180-197, doi: 10.1016/j.jpdc.2019.08.005.
- [56] Diego Álvarez Guinarte IOTPlatformBC-based Github repository <https://github.com/dalvgui/IOTPlatformBC-based>

Design of a Density Sensor for Biological Wastewater Treatment and Testing in a Pilot Plant

J.A. Muñoz-Hernández¹, H. Muñoz-Hernández², K.A. Oviedo-Priolo³, R.C. Osorio-Mass⁴
amunoz@ut.edu.co, helmer_munoz@cun.edu.co roberto.osoriom@campusucc.edu.co

Abstract—In the present study, the design of a density sensor based on piezoelectric crystals is investigated. Preference was given for using piezo crystals, however the option of a vibrating tube element remains. Although the design is complete, the validation test is being developed. In the second tank sedimentation occurs, therefore the clean water will be in the upper part of the tank. It would be very useful being able to decide from which height the water is clean enough to be tapped from the tank. This can be done with a density sensor which is used to characterize the density profile inside the settler of a pilot wastewater treatment plant, because the density is related to the number of flocs and dirt in the water. Results showed that the material being used for the piezo crystals must be Lead Zirconium Titanite (PZT); however, a full integration of both the electrical part and the sensing part could be realized.

Index Terms—Biological, piezoelectric crystal, ultrasonic, sensor.

I. INTRODUCTION

THE activated sludge process is a continuous or semi-continuous aerobic method for biological wastewater treatment. The process is based on aeration of wastewater with flocculating biological growth, followed by separation of treated wastewater from this growth. Part of this growth is then wasted and the remainder is returned to the system. Usually the separation of the growth from the treated wastewater is performed by settling but it may also be done by flotation or other methods.

The basic schema of a wastewater treatment plant by activated sludge is shown in Figure 1. Water containing particulate matter flows slowly through this tank and is thus detained long enough for the larger particles to settle to the bottom before the clarified water leaves the tank. Particles that have settled to the bottom of the tank are removed manually or by mechanical scrapers on the site depending on their treatment

and/or removal. Detention time is typically 3 hours in tanks of 3 to 5m deep.

Controlling the sludge concentration in the aeration tank (settler tank) is important for making treated sewage clean at sewerage treatment plant using the activated sludge process. Therefore, measurement instruments enabling continuous and accurate monitoring of sludge are required.

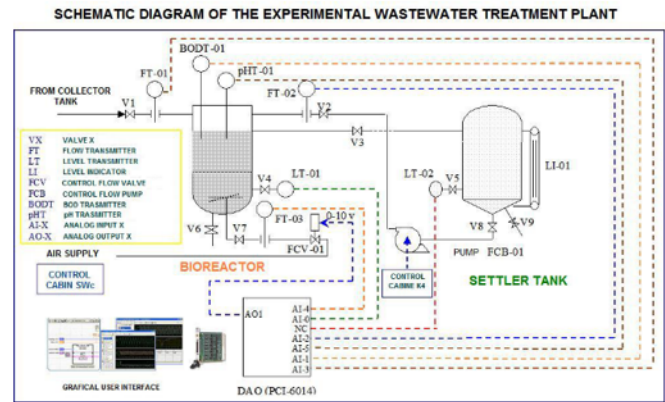


Fig. 1. Schematic diagram of the Pilot Wastewater Treatment Plant.

In the sedimentation tank these flocs will settle forming a density profile over the all tank. To extract the clean water, this profile must be identified to obtain the point at which clean water can be extracted from the plant.[5], shows that the sludge settling characteristics and the conditions of sludge thickening or clarification in the secondary settling tank are important when taking about modeling and control. In this sense, it is important to design sensors to measure density profile inside these vessels. Settling characteristics for sludge are important in determining the performance of the secondary settler, and the efficiency of the whole waste water treatment plant, which implies measuring the density,[4].

To design this kind of sensor based on Piezoelectric Crystals working as the frequency-determining element in an oscillator, the electrical parameters dielectric constant and conductivity of the liquid additionally must be considered

II. METHODS

A. Generalities

Normally, to measure the density of a fluid, a vibrating tube element (Fig. 2) is used, [2]. The principle drawback of this sensor is its mass, the bigger the mass the lower its

¹ Petroleum engineer, Universidad Surcolombiana - Usco, Colombia. DSc in Engineering, Universiteit Leuven, België. MSc en Automatic Control, Rijksuni-versiteit Te Gent, België. Lecturer at Universidad del Tolima, Colombia. E-mail: amunoz@ut.edu.co

² JSystems Engineer, National Unified Corporation of Higher Education CUN. DSc in Management, Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín, Venezuela. MSc in Industrial Control Engineering, Universidad de Ibagué, Colombia. AXON research group leader, Colombia. E-mail: helmer_munoz@cun.edu.co

³ Physicist, Master of Business Administration, Systems Engineering Program Teacher, Member of the AXON Research Group, Category A in Minciencias, Unified Corporation of Higher Education CUN

⁴ Research Professor, Business Administration Program, Cooperative University of Colombia, Industrial Engineer, MsC in Business Management and Administration. roberto.osoriom@campusucc.edu.co

accuracy. The tube is clamped at each end and a transverse force is applied to the tube using a drive coil connected to the maintaining amplifier in a resonator circuit. This causes transverse deflection of the tube center, which is sensed by a pick-up coil and fed back to the amplifier. By correct choice of the amplifier gain and phase characteristics, the tube is continuously maintained in transverse oscillation at a fundamental frequency f_n given by (1), where m and therefore f_n depend on the fluid density as exposed in (2).

$$f_n = 1/2\pi\sqrt{k/m} \quad (1)$$

$$\rho = A/f_n^2 + B/f_n + C \quad (2)$$

Where f_n : fundamental frequency, Hz, ρ : Fluid density, kg/m^3 , m : sensor mass, kg.

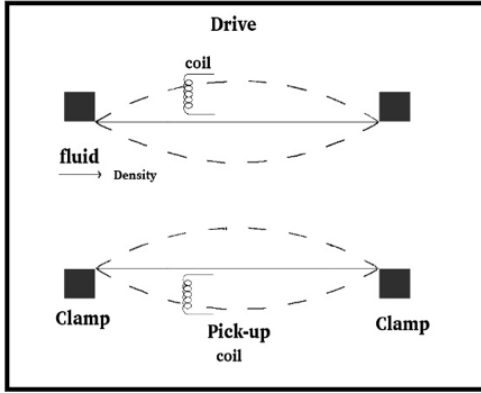


Fig. 2. Schematic of the vibrating tube element.

The values of A, B, y C in equation (2) must be found experimentally. In order to avoid the drawbacks presented by the resonating tube, a design involving piezoelectric crystals are studied,[11]. In a first stage of the design of the density sensor, two piezo crystals were glued on a circuit board of 1.5 by 1.5 cm. Both crystals were placed with their sensitive axis to each other to get maximal output at the receiver part of the sensor. In between the crystals a gap was made in the plastic board for the fluid to be able to enter the space between the crystals and allow the fluid analysis. Piezoelectric crystal produces an electric charge when it is subjected to a force or pressure. This amount of charge is proportional to the applied pressure, independent of the size and form of the crystal. The resulting charge is given by:

$$C_x = d_{11}F_x\eta \quad (3)$$

Where d_{11} , F_x and n are the piezoelectric coefficient, applied force in the x-direction and the number of elements respectively. The construction of the new sensor involves the optimization for energy transfer and electron-ic isolation. Because of the large temperature variations inside the water clearance reactor, this design must be compensated for temperature effects by means of a temperature element.

B. Energy Transfer

To increase the energy transfer in the piezoelectric crystals the following criteria were used:

- Crystal location: The crystals were located face to face. This position increases the transfer of mechanical energy through the media, due to the shorter path and therefore lower energy dissipation on the media.
- Directional waves: To increase the output power of the sending wave a high acoustic impedance material was located at the back of the piezo-electric crystal. Generally, the radiation pattern of a piezoelectric crystal is bidirectional, which implies a loss of energy on the backwards direction. The use of a high acoustic impedance material in the back reflects a fraction of the back wave into the main direction, thus, an enhancement of the output signal power is achieved. The material used for the impedance material was silicone.

C. Isolation

The sensor must be isolated because it will be submerged into liquid. On other hand, the backing layer and the buffer layer (isolator) of the sensor must have different acoustic impedance to avoid the decreased in the output power. The acoustic impedance of the isolator must be lower than the one of the backing layer. The material found that accomplishes both requirements is the cellulose acetate.

D. Physical implementation

A final layout of the sensor can be seen in the Figure 3. The material of the piezoelectric crystal is Lead Zirconium Titanate or PZT. This material was selected due to its frequency behavior and its dissipation vs distance curve. The material was characterized to find the frequency and distance at which the output presents maximum output power and is stable enough to generate a confident measurement. The characterization curves can be seen in Figures 4 and 5.

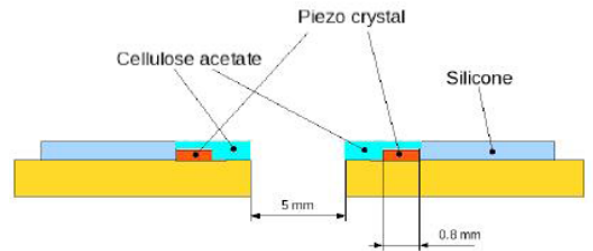


Fig. 3. Final design. Side view of the different layers being used.

The final sensor implementation is presented in Figure 6. The leads and the circuit board are both isolated.

As can be seen in Figure 4, the sensor behaves almost linear in a wide frequency range. Figure 5 shows that at short distances the ratio behaves almost oscillatory, while, at bigger distances the measure stabilizes, however, the output power decreases. Figure 6 shows the practical realization of the sensor after isolation of all the conducting parts. The sending

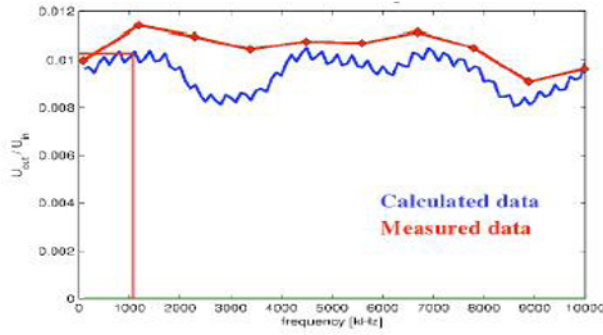


Fig. 4. Frequency response of the piezoelectric crystals, x-axis represents frequency and y-axis represents the ratio between output and input power. In blue, the data simulated corresponding to the piezoelectric crystal used. In red the data measured at the laboratory.

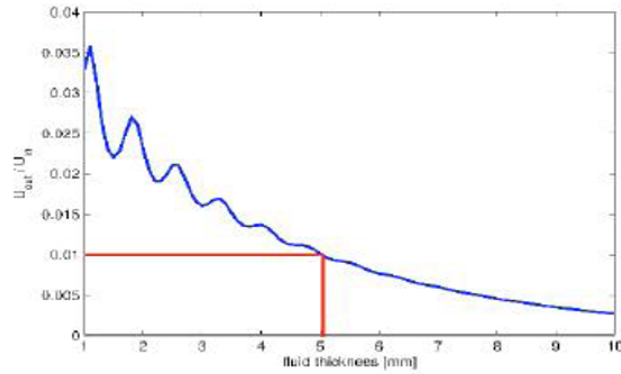


Fig. 5. Variation between the ratio output-input power and the distance of separation of the piezoelectric crystals.

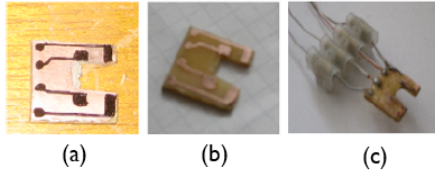


Fig. 6. Sensor final stage. (a) Drawing of circuit path onto the board (b) Re-sulting sensor after etching process (c) Final sensor after isolation of all the conducting parts.

part of the sensor was connected to a function generator for characterization of the global circuit at different frequencies while the receiving part was connected to a filter circuit. However, some difficulties were encountered because of a high capacitive coupling between the input and output. The receiving part of the sensor was connected to a filter circuit. This circuit is necessary for the user to be able to analyze the fluid under investigation.

E. Ultrasonic waves

The sending piezo crystal directs waves with a frequency of above 20kHz into the fluid of which the density must be measured.

Before these waves are being detected by the receiving piezo crystal, they reflect partially at the interfaces between

varied materials. The goal of understanding how the US waves propagate through the different media and how they behave at the interfaces between these media, is to have a maximal energy transfer from the input to the output.

The piezo crystals had to be characterized first. For this characterization, test data were being compared with the computed data in Matlab. These computations were being done for the design shown in Figure 3. A backing and buffer layer are also included for maximalization of the energy transfer. Cellulose acetate (nail polish) was used for the buffering layer because of its wide availability and applicability as an isolator. For the backing layer, a material with a totally different acoustic impedance ZL had to be used to reflect as much energy as possible towards the fluid under investigation. For reasons of good and thick isolation (lowering of the present capacitive coupling) and a high ZL, anisotropic silicones were being used.

F. Materials

Characteristics of the varied materials being used are given in Tables I, II, III, IV. With this data it became possible to calculate the variations of the ratio of the output and input signal with the applied frequency. These data would be useful in determining the type of piezo material by com-parison with experimental data. In this experiment, the measuring medi-um was chosen to be clean water.

TABLE I
CHARACTERISTICS OF POSSIBLE PIEZO CRYSTALS

MATERIAL	VL[m/s]	$\rho[kg/m^3]$	ZL[Rayl]	N[m]
PVDF	$2.3 \cdot 10^3$	$1.79 \cdot 10^3$	$4.2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^2$
Quartz - X-cut	$5.75 \cdot 10^3$	$2.65 \cdot 10^3$	$15.3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^2$
PZT	$4.72 \cdot 10^3$	$7.95 \cdot 10^3$	$37.5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^2$

TABLE II
BUFFER LAYER CHARACTERISTICS

MATERIAL	VL[m/s]	$\rho[kg/m^3]$	ZL[Rayl]	$\alpha[N\rho/m]$
cellulose acetate	$2.45 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^3$	$3.18 \cdot 10^6$	$21.9 \cdot 10^2$

TABLE III
BACKING LAYER CHARACTERISTICS

MATERIAL	VL[m/s]	$\rho[kg/m^3]$	ZL[Rayl]	$\alpha[N\rho/m]$
Epoxy	$2.70 \cdot 10^3$	$1.21 \cdot 10^3$	$3.25 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^2$
Silicone	$8.43 \cdot 10^3$	$2.34 \cdot 10^3$	$19.7 \cdot 10^6$	$3.8 \cdot 10^2$

TABLE IV
MEASURED LAYER CHARACTERISTICS

MATERIAL	VL[m/s]	$\rho[kg/m^3]$	ZL[Rayl]	$\alpha[N\rho/m]$
Water	$1.48 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1.48 \cdot 10^6$	$23 \cdot 10^2 / (20 \cdot \log_{10} e)$
Air	$0.34 \cdot 10^3$	1.293	$0.42 \cdot 10^6$	1

G. Signal Processing

The signal that is received from the piezoelectric crystal has small ampli-tude and contains a lot of noise. This high frequency noise is related to nonlinearities due to the dispersion

of the waves in the media. Because of this, it is necessary to amplify and filter the signal to increase his SNR (signal noise ratio).

On other hand, the input signal is corrupted by line power noise. To elimi-nate the variation of the input signal due to the line power a high pass filter with a cut-off frequency of 1 KHz was used. The output signal (given by the receiver) was filtered with a low pass filter with a cut-off frequency of 10MHz.

The change in density produces a change in the amplitude of the output signal. To convert this AC signal to a DC value a rectifier is needed. Af-terwards, the rectified signal was filtered with a filter with a cut-off fre-quency of 1Hz to eliminate the variations in the signal. This processing in the signal gives a DC value that is related to the density of the media. Further signal conditioning is needed to achieve industrial standards.

III. RESULTS

To test the viability of the sensor some experiments where done. Figure 7 shows the frequency response of the sensor in air and dirty water.

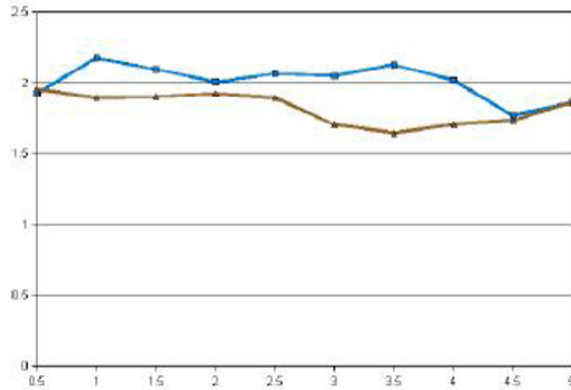


Fig. 7. Frequency response of the sensor in clean and dirty wa-ter, in the x-axis the Frequency MHz) and in the y-axis the output voltage (V).

In first design of the sensor some problems were encountered with the isolation of the conducting parts. As could be expected from our previous calculations, the output signal of the receiver part changed when the space between the two crystals was being filled with water. However, when the sensor was further submerged in the water, the output signal also became higher. An explanation for this phenomenon is given by the capacitive coupling that exists between the sender and receiver. Having in mind that a signal of more or less 10 Volt was applied at the sender and only a small signal of approximately 1 Volt was being detected, a greater capacitive coupling was being created because of the aqueous (conduct-ing) environment that filled the space in between the varnished conduct-ing parts. A possible solution to this problem comprises the use of a thick-er isolation material that does not allow for the water to enter the space between the conducting parts. In this way only the space in between the two crystals would be free for the fluid to occupy. Therefore, another thicker isolation material was used, namely anisotropic

silicones, as mentioned in the subsection about ultrasonic waves.

There can be seen that the best performance of the sensor is achieved at 3.5MHz, point at which the measurement of the dirty water compared with the clean water gives a higher difference in amplitude.

It is necessary then to do a highly sensitive, self-calibrating, on-line sensor for characterizing the liquid in the settler during settling and continuously monitor the separation and transition zones of the clarification and settling phases, so that process can be efficiently operated. [1] show the measure of the reflections at the fluid–sensor interface, sound speed, and attenuation of ultrasound to determine the fluid density and solids concentration.

The state of technology of the ultrasonic sensor systems is shown in [9], where the advantages and limitation of ultrasonic sensors are presented.

A. Data Processing and Electronics

The signal that is received from the piezo Cristal has only a small ampli-tude and contains a lot of noise. Because of this it is necessary to amplify and filter the signal. The receiver circuit consists of various parts as shown in Figure 8.

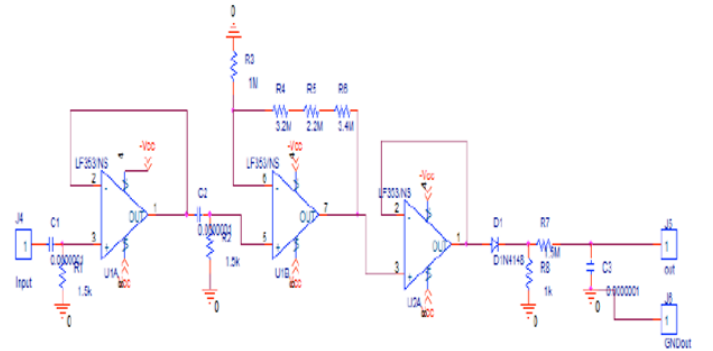


Fig. 8. The final signal processing circuit

IV. CONCLUSIONS

It became clear that the material being used for the piezo crystals must be Lead Zirconium Titanate (PZT), and because of the large temperature variations inside the water clearance reactor, this design must be compen-sated for temperature effects by means of a temperature element. The sensor can be applied to measure Sludge levels in settling basins or tanks: used to locate the interface layer between two or more phases. There can be used to measure the density profile and thereby picture the heights of the different product layers inside a vessel. On other hand, some extra improvements of the sensors must be done in the future:

- Calibration of the sensor needs to be performed and compare with other industrial sensors, as ultrasonic sensors.
- Linearity and some other static characteristics of the sensor must be evaluated.
- Further signal processing is needed to achieve industrial standards.

Finally, the full technology should be proven to ensure stable and reliable measuring values by eliminating interferences (floating sludge, gas bubbles) and connections to transmitters must be secured.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank L. Dennis for developing the electronic part of the sensor and wants to thanks to CUN National Unified Higher Education Corporation for the financial support.

REFERENCES

- [1] Bamberger, J. A. & Greenwood, M. S. (2004). Non-invasive characterization of fluid foodstuffs based on ultrasonic measurements. *Food research international*, 37, 621-625.
- [2] Bentley, J. P. (2005). *Principles of measurement systems*. Prentice Hall.
- [3] Cheeke, J. D. (2012). *Fundamentals and applications of ultrasonic waves*. CRC Press LLC.
- [4] Chen, G. W., Chang, I. L., Hung, W. T., & Lee, D. J. (1996). Regimes for zone settling of waste activated sludges. *Water Research*, 30, 1844-1850.
- [5] Cho, S. H., Chang, H. N., & Prost, C. (1996).
- [6] Steady state analysis of the coupling aerator and secondary settling tank in activated sludge process.
- [7] *Water Research*, 30, 2601-2608.
- [8] Density – the key to product consistency. (2001). *Sensor Review*, 21(4). <http://dx.doi.org/10.1108/sr.2001.08721dad.007>.
- [9] Farach-Colton, M. & Mosteiro, M. (2014). Initializing Sensor Networks of Non-Uniform Density in the Weak Sensor Model. *Algorithmica*, 73(1), 87-114. <http://dx.doi.org/10.1007/s00453-014-9905-5>.
- [10] Henning, B. & Rautenberg, J. (2006). Process monitoring using ultrasonic sensor systems. *Ultrasonics*, 44, e1395-e1399.
- [11] Muñoz, J.A. (2013). Design of a density sensor based on piezoelectric crystals for the identification of the density profile in a wastewater treatment plant settler. *IFAC proceedings volumes (IFAC-papers online)*, 4, 288 – 292.
- [12] Puttmer, A., Hauptmann, P., & Henning, B. (2000). Ultrasonic density sensor for liquids. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 47, 85-92.
- [13] Shang, Y. & Shi, H. (2007). Flexible Energy Efficient Density Control on Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 3(1), 5-21. <http://dx.doi.org/10.1080/15501320601066727>
- [14] Wang, (2009). Movement-Assisted Deployment for Irregular Sensor Density in Wireless Sensor Networks. *JCIT*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.4156/jcit.vol4.issue2.wang>.
- [15] Weiss, B., Heinisch, M., Reichel, E., & Jakoby, B. (2013). Driving modes and material stability of a double membrane rheometer and density sensor. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2(1), 19-26. <http://dx.doi.org/10.5194/jsss-2-19-2013>
- [16] Shang, Y. & Shi, H. (2007). Flexible Energy Efficient Density Control on Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 3(1), 5-21. <http://dx.doi.org/10.1080/15501320601066727>
- [17] Wang, (2009). Movement-Assisted Deployment for Irregular Sensor Density in Wireless Sensor Networks. *JCIT*, 4(2). <http://dx.doi.org/10.4156/jcit.vol4.issue2.wang>.
- [18] Weiss, B., Heinisch, M., Reichel, E., & Jakoby, B. (2013). Driving modes and material stability of a double membrane rheometer and density sensor. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2(1), 19-26. <http://dx.doi.org/10.5194/jsss-2-19-2013>



José Aldemar Muñoz Hernández Petroleum Engineer (Universidad Sur Colombiana), Specialist in Industrial Automation (University of Ibagué in agreement with the Catholic University of Leuven and the University of Ghent (Belgium), Master in Automatic Process Control (University of Ghent, Belgium), PhD in Electrical Engineering - University of Leuven, Belgium, currently teacher-researcher (University of Tolima). He has experience in projects of Automation, Modeling and Simulation of processes and Instrumentation and Control, Senior Researcher and peer reviewer of Colciencias, active member of the research group CEDAGRITOL and works in the line of research related to Biofuels. CVLAC: <https://bit.ly/3hHjSEI>



Helmer Muñoz Hernández, Systems Engineer, Master in Industrial Control Engineering, Doctor in Management, Postdoctoral Research, Senior Researcher and Peer Evaluator of Minciencias. Academic Par Ministry of National Education, Leader of the AXON Research Group, Engineering School National Unified Corporation of Higher Education CUN.



Kavir Alá Oviedo Prioló Physicist, Master of Business Administration, Systems Engineering Program Teacher, Member of the AXON Research Group, Category A in Minciencias, Unified Corporation of Higher Education CUN



Roberto Carlos Osorio Mass Research Professor, Business Administration Program, Cooperative University of Colombia, Industrial Engineer, MSc in Business Management and Administration. roberto.osorion@campusucc.edu.co

Balance of a bipedal robot from the comparative simulation of the PID and LQR controllers

J. D. Téllez¹, R.A. Acosta Rodríguez², K.A. Oviedo-Priolo³, R.C. Osorio-Mass⁴
juan.diaz@puebla.tecnm.mx, raacostar@correo.udistrital.edu.co germanardul.munoz@correo.buap.mx,
fermi.guerrero@correo.buap.mx

Abstract—This article aims to present a comparison based on the simulation of the Matlab Simulink tool, the PID controllers (proportional integral derivative) and the LQR controller (linear quadratic regulator). From the mathematical models such as the state variables and the linearization of the system, to find the equilibrium points, which describe the behavior of the autonomous bipedal robot. After this, different design techniques are applied to both controllers, comparing their control strategies and optimal system performance, and finally, a criterion is established according to their performance.

Index Terms—Bipedal robot, LQR controller, Matlab Simulink tool, PID controller.

I. INTRODUCTION

MOBILE robots in recent years have been developed to facilitate tasks for human beings in their daily lives, so research has been of interest to obtain fully autonomous robots. The Segway has become a modern transportation alternative whose operation is based on finding the balance between a base with two side wheels. Una subsección. The two-wheel autonomous self-balancing mobile robot model that we present is based on the inverted pendulum principle. Inverted pendulum dynamics have been the basis for bipedal robots, space propellers, and attitude control of small satellites. The following figure shows the basic movements of the robot, driving backward movements, driving sideways movement and turning on its own axis in figure 1

Backward movement is achieved when the speed of both motors is increased or decreased by the same amount. Lateral movement is achieved when speed is increased of the left motor, while the speed of the right is reduced and vice versa. Spinning on its own axis is achieved when the speed of both motors is increased in the opposite direction.

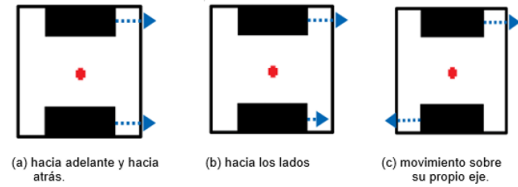


Fig. 1. Robot movement (Own design).

II. PROCEDURE

A. Revie stage

The modeling is analyzed mathematically from the application of Newton's laws of motion, where the forces and variables that act in the system are observed in figure 1. The bar is considered to have negligible mass and at its upper end a mass (m) is positioned that oscillates freely around a fixed pivot (P) mounted on the carriage of mass (M) that moves along a linear path. [1]

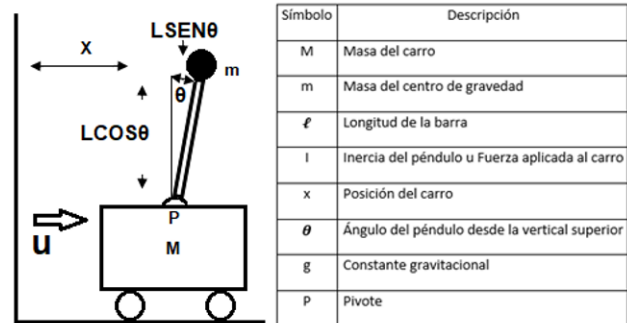


Fig. 2. Inverted Pendulum System on a Cart

The friction coefficients of the pivot and the wheels are considered negligible and the table represents the description of the system variables shown in figure 2

III. MATHEMATICAL MODEL

First, the forces acting on the horizontal axis for the car and the pendulum are analyzed, obtaining:

¹ Juan Díaz Téllez, Msc. Engineering, doctor of Engineering, Teacher Department of Electronics Instituto Tecnológico de Puebla, México, juan.diaz@puebla.tecnm.mx

² Rafael Antonio Acosta Rodríguez, Electronics engineering, teleinformatics specialist, Msc. Mechatronics Engineering, doctor of Engineering Universidad Distrital F.J.C., Bogotá, Colombia, raacostar@correo.udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4165-1497>

³ Germán Ardul Muñoz Hernandez, Msc electronic sciences, Phd Control System, Teacher Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, germanardul.munoz@correo.buap.mx

⁴ Jose Fermi Guerrero Castellanos, Msc and Phd in Automatic Control, Teacher electronic sciences Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México Fermi.guerrero@correo.buap.mx

$$\begin{aligned}
\sum F_{x_{\text{carro}}} &= M\ddot{x} \\
M\ddot{x} &= F - b\dot{x} - N \\
N &= F - b\dot{x} - M\ddot{x} \\
\sum F_{x_{\text{pendulo}}} &= m\ddot{x} \\
m\ddot{x} &= N - m\ell\ddot{\theta} \cos \theta + m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta \\
N &= m\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta} \cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
F - b\dot{x} - M\ddot{x} &= m\ddot{x} + m\ell\dot{\theta} \cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta \\
(M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + m\ell\ddot{\theta} \cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta &= F \\
P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta &= m\ddot{x} \cos \theta + m\ell\ddot{\theta}
\end{aligned} \tag{2}$$

By equating equations (1) and (2), we obtain the first dynamic equation of our system:

$$F - b\dot{x} - M\ddot{x} = m\ddot{x} + m\ell\dot{\theta} \cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta \tag{3}$$

$$(M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + m\ell\ddot{\theta} \cos \theta - m\ell\dot{\theta}^2 \sin \theta = F$$

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mg \sin \theta = m\ddot{x} \cos \theta + m\ell\ddot{\theta} \tag{4}$$

second equation is obtained to the perpendicular forces that act in our system obtaining the equation (4) the torque of the forces on the pendulum rod gives us another equation to obtain the dynamic equation of the system.

$$T = \sum F_i r_i = I\ddot{\theta} = -PI \sin \theta - NI \cos \theta \tag{5}$$

Putting equations (4) and (5) together, the following equation is obtained:

$$\begin{aligned}
m\ddot{x} \cos \theta + m\ell\ddot{\theta} + mg \sin \theta &= I\ddot{\theta} / I \\
(m\ell^2 + I) \ddot{\theta} + mlg \sin \theta &= mI\ddot{x} \cos \theta
\end{aligned} \tag{6}$$

The control objective for the system is to keep the pendulum as vertical as possible. Considering that the angles θ and $\dot{\theta}$ are small, it is possible to linearize the system in the equations (3) and (6) by substituting $\sin \theta = 0$ y $\cos \theta = 1$. Considering that the force F corresponds to the control signal u , respectively and with the previous expressions, equations (7) and (8) are obtained.

$$(M+m)\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta} = u(t)m\ell\ddot{x} + (I+m\ell^2) \ddot{\theta} \tag{7}$$

$$u(t)m\ell\ddot{x} + (I+m\ell^2) \ddot{\theta} = mg\ell\theta \tag{8}$$

The motion of the system is limited to two degrees of freedom and its nonlinear mathematical model is represented by equations (7) and (8). Expression (9) represents the linear ordinary differential equations of the system in matrix form.

$$\begin{bmatrix} M+m & m\ell \\ m\ell & I+m\ell^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(t) \\ mg\ell\theta \end{bmatrix} \tag{9}$$

Expression (10) is used to obtain the terms $\ddot{x}$ y $\ddot{\theta}$ respectively.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} u(t) \\ mg\ell\theta \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$A = \begin{bmatrix} M+m & m\ell \\ m\ell & I+m\ell^2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I+m\ell^2)(u(t)) - (m^2\ell^2)(g\theta)}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \\ \frac{-m\ell(u(t)) + (M+m)(mg\ell\theta)}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \end{bmatrix} \tag{12}$$

The mathematical model for the control design is represented by equations (13) and (14)

$$\ddot{x} = \frac{(I+m\ell^2)(u(t)) - (m^2\ell^2)(g\theta)}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \tag{13}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-m\ell(u(t)) + (M+m)(mg\ell\theta)}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \tag{14}$$

The approximate linearization of the system at the equilibrium point is represented by equation (15) in state variables

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+m\ell^2}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \\ 0 \\ \frac{m\ell}{(M+m)(J+m\ell^2) - m^2\ell^2} \end{bmatrix} u \\
Y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u
\end{aligned} \tag{15}$$

IV. PID AND LQR CONTROLLERSLQR

(Linear Quadratic Regulator) control consists of the stability of a closed-loop system with the feedback gain. This method consists of optimizing the cost, the weight matrices Q and R become the design parameters [1].

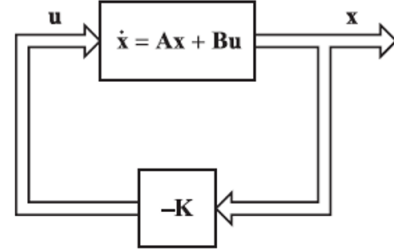


Fig. 3. Optimal regulatory system

Therefore, having already obtained the mathematical model in state variables of the dynamic system

$$y = Cx \dot{x} = Ax + Bu \tag{16}$$

$$x \in \mathbb{R}^n \text{ y } u \in \mathbb{R}^m \text{ With } \tag{17}$$

$$J = \int_0^\infty (x * Qx + u * Ru) dt \text{ the cost function } \tag{18}$$

$$u(t) = -Kx(t) \text{ of the optimal control vector } \tag{19}$$

To achieve this result it is required to solve the following Riccati differential equation, in the solution it cannot be reduced to a finite number of successive integrations

$$A * P + PA - PBR^{-1}B * P + Q = 0 \tag{20}$$

to obtain the optimal matrix K , MATLAB will be used since it counts the order $K = lqr(A, B, Q, R)$

PID control is a classic feedback control method, it consists of calculating the difference between the measured value and

the desired value, this difference is known as error. This system has three components: gain proportional, integral gain and derivative gain. The first depends on the current error, the second on past errors and the third is a prediction of future errors [1].

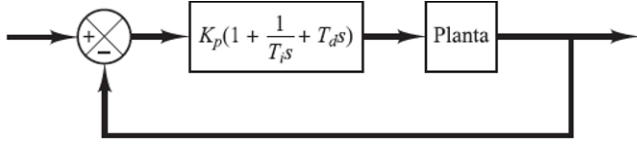


Fig. 4. PID control of a plant

The proportional action P, gives a control signal that is proportional to the error:

$$u(t) = K_P e(t) \quad (21)$$

The integral action I has a control signal proportional to the accumulated error, which is defined as:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) \quad (22)$$

Finally, the differential action D provides:

$$u(t) = K_d \frac{de}{dt} \quad (23)$$

Run the sum of these three components, the signal obtained from the PID controller is

$$u(t) = K_P e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de}{dt} \quad (24)$$

MATLAB® has a tool in Simulink® to work with the model this is PID Tuner automatically designs a controller (P, I, PI, PD, PDF, PID, PIDF) and the way that the response time or the transient behavior and see how controller parameters such as KP, TN and TD(TV) or KI and KD are modified and response parameters such as settling time, overshoot, etc.. [2]

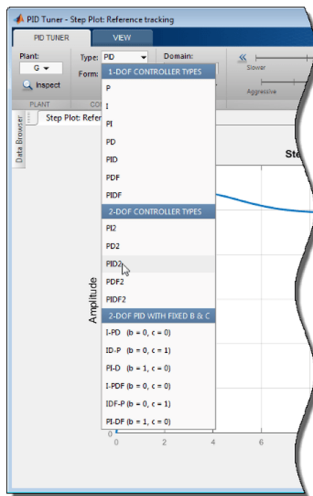


Fig. 5. Tuner Application

Inside the PID tuner app is PID 1-DOF where PID is found, as shown in figure 6.

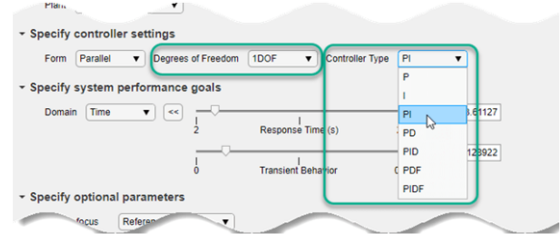


Fig. 6. PID Tuner Application (PID 1-DOF)

Design is done by Simscape™ which allows us to quickly deploy physical system models within the Simulink® environment, for control implementation and system-level performance testing.

V. IMPLEMENTATION

The robot model is developed in Simscape™ to implement the PID and LQR controllers, then see their behavior and be able to compare the two controllers.

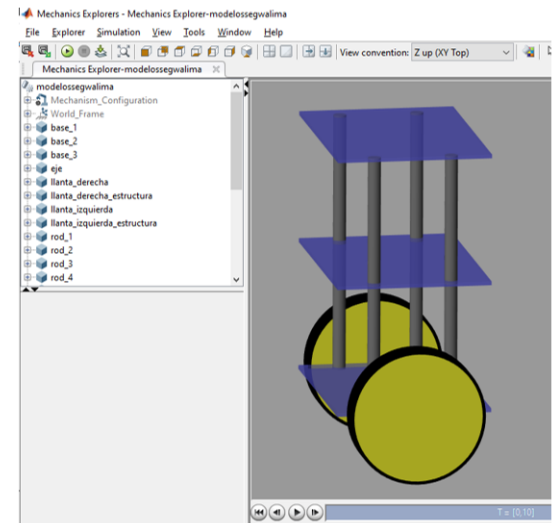


Fig. 7. Model in Simscape™

Figure 8 shows the model of the mobile robot implemented in Simscape™ and figure 9 shows it in blocks in Simulink®

The following figure 10 shows the code in Matlab to obtain the matrix K, using the LQR command.

Figure 11 shows the response obtained with the LQR control with a perturbation.

Figure 12 shows the implementation of PID control in our system.

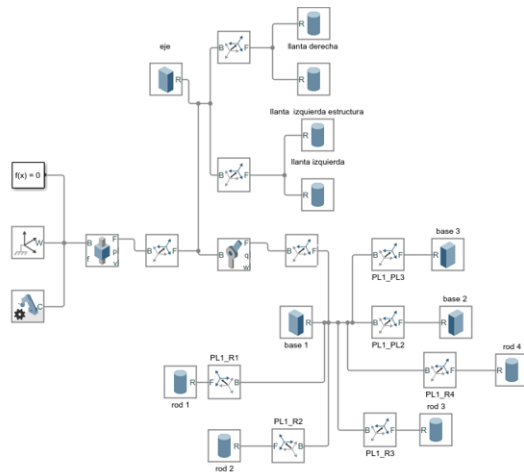


Fig. 8. Block model in Simulink®.

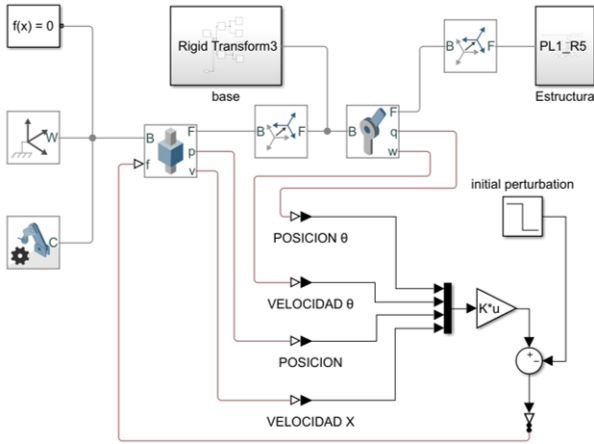


Fig. 9. Implementation of the LQR control.

```

Editor - C:\Users\LIMA-LIMON\Documents\CONTROL_OPTIMO_LQR.m
CONTROL_OPTIMO_LQR.m
1 - M = 1;
2 - m = 0.2;
3 - b = 0.1;
4 - I = 0.0005;
5 - g = 9.8;
6 - l = 0.125;
7
8 - p = I * (M+m) + M*m*l^2;
9
10
11 - A = [0 1 0 0;
12 - (I+m*l^2)*b/p (m^2*g*l^2)/p 0;
13 0 0 0 1;
14 0 -(m*l*b)/p m*g*l*(M+m)/p 0];
15 - B = [(I+m*l^2)/p;
16 0;
17 m*l/p];
18 - C = [1 0 0 0;
19 0 0 1 0];
20 - D = [0;
21 0];
22
23
24
25 - Q = [50 0 0 0;
26 0 0 0 0;
27 0 0 50 0;
28 0 0 0 0];
29
30 - R = 950;
31
32 - K = lqr(A, B, Q, R)
33

```

Fig. 10. Obtaining the matrix K, using matlab

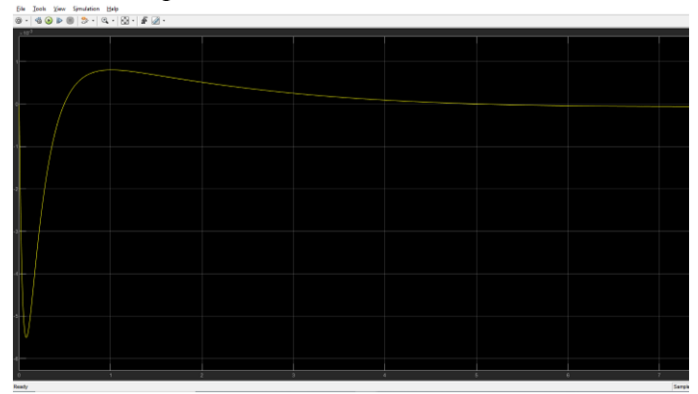


Fig. 11. Representation of the LQR control in the system with a disturbance.

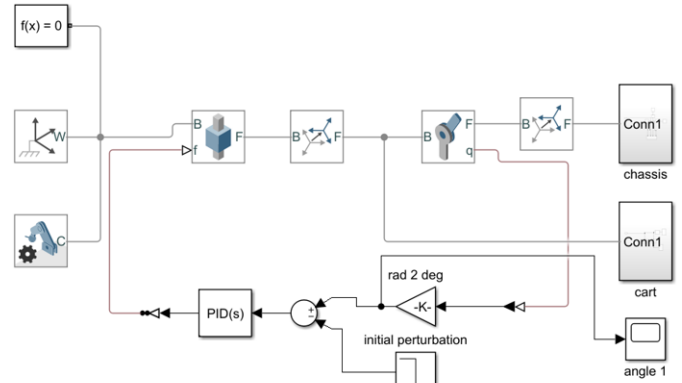


Fig. 12. PID control implementation.

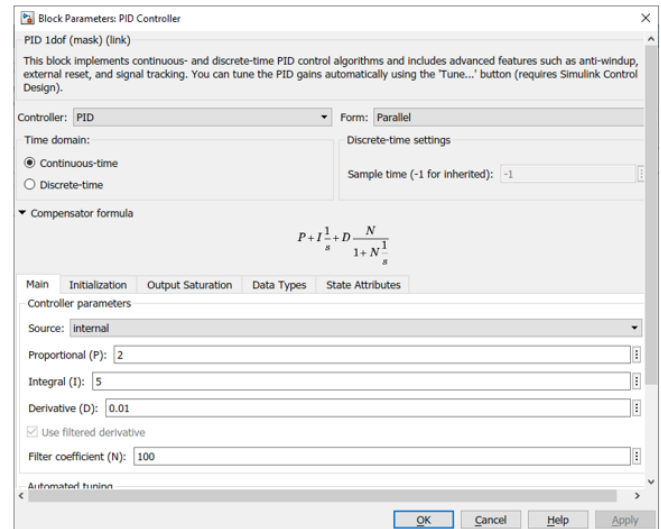


Fig. 13. PID parameters Figure.

VI. CONCLUSIONS

It should be noted that the LQR based control on the linear system achieves smoother stabilization than a PID control. It should be noted that simulations of different external disturbances, noise in the actuators and sensors, especially the inertial unit sensor, were carried out.

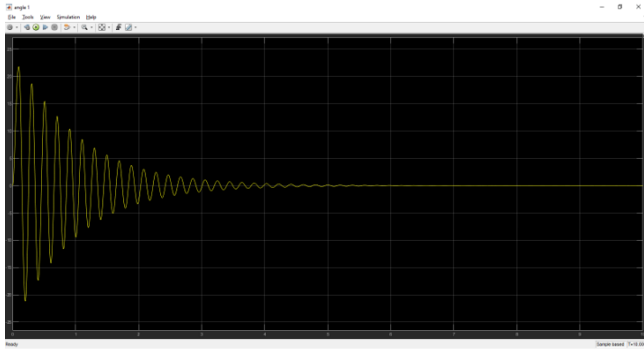


Fig. 14. Representation of the PID control in the system with a disturbance.

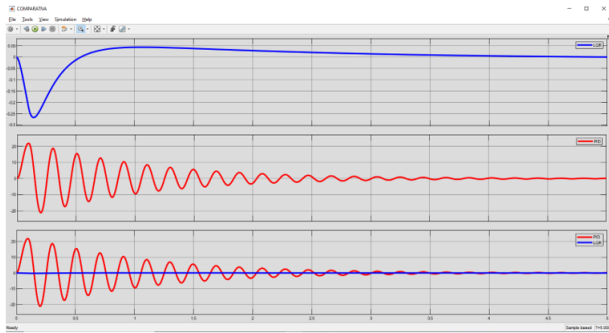


Fig. 15. Comparison between the PID control and the LQR in the system with a disturbance.

Concluding that the LQR control is optimal for energy expenditure efficiency with different disturbances moving away from its equilibrium point, the control algorithm is able to stabilize the system. Therefore, PID control has more difficulty to stabilize.

REFERENCES

- [1] Ogata, katsuhiko. ingenieria de control moderna. 5a. ed. madrid: prentice hall hispanoamericana,2010.
- [2] Braunl, Thomas. (2006).Embedded robotics: Mobile robot design and applications with embedded systems: Second edition.Second 10.1007/3-540-34319-9.
- [3] Sira-Ramírez, Hebertt and Márquez, Richard and Rivas, Francklin and Santiago, Orestes (2018), Control de Sistemas No Lineales: Linealización aproximada, extendida, exacta:8420544493, 9788420544496
- [4] L. J. Pinto, D. -H. Kim, J. Y. Lee and C. -S. Han, "Development of a Segway robot for an intelligent transport system," 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2012, pp. 710-715, doi: 10.1109/SII.2012.6427308.
- [5] B. Shilpa, V. Indu and S. R. Rajasree, "Design of an underactuated self balancing robot using linear quadratic regulator and integral sliding mode controller," 2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/IC-CPCT.2017.8074224.
- [6] I. D. Basnayake, T. W. U. Madhushani and D. H. S. Maithripala, "Intrinsic PID controller for a segway type mobile robot," 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIINFS.2017.8300402.
- [7] J. Solis, R. Nakadate, Y. Yoshimura, Y. Hama and A. Takanishi, "Development of the two-wheeled inverted pendulum type mobile robot WV-2R for educational purposes," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, pp. 2347-2352, doi: 10.1109/IROS.2009.5354088.
- [8] M. U. Draz, M. S. Ali, M. Majeed, U. Ejaz and U. Izhar, "Segway electric vehicle," 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence, 2012, pp. 34-39, doi: 10.1109/ICRAI.2012.6413423.
- [9] M. H. Khan, M. Chaudhry, T. Tariq, Q. -u. -A. Fatima and U. Izhar, "Fabrication and modelling of segway," 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2014, pp. 280-285, doi: 10.1109/ICMA.2014.6885709.
- [10] S. Chantarachit, "Development and Control Segway by LQR adjustable Gain," 2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT),2019,pp.649-653,doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938489.

Método que permita identificar la cantidad necesaria de personal requerido en una oficina de atención al cliente.

Wilson Alfonso Cepeda-Cepeda, Juan Carlos Figueroa-García
Universidad Francisco José de Caldas
wacepedac@correo.udristrital.edu.co, jcfigueroag@udistrital.edu.co

Resumen—Parte de la experiencia de un cliente está asociada al tiempo en que puede ser atendido en los centros de servicios de una organización, sin embargo, por la limitación de recurso siempre se tendrá que esperar un determinado tiempo para que estos suceda, para ello uno de los problemas es identificar Cuál es la cantidad necesaria de personal para las oficinas de atención al público de la Organización, que permitan tener un nivel de servicio superior o igual al 80 %, garantizando que el tiempo de espera promedio no llegue a los 15 minutos, contemplando los tiempos ociosos, ausencias del personal asignado en las oficinas, para ello este documento pretende desarrollar un método que permita identificar la cantidad necesaria de personal requerido en una oficina de atención al público, definidos por unos lineamientos normativos a nivel país.

Palabras Clave—Atención al cliente, nivel de servicio, tiempo ocioso, ausencia de personal, experiencia, oficinas centros de atención a clientes.

I. INTRODUCCION

COMO consecuencia de los bajos niveles de servicio en las oficinas de atención a clientes el Estado Colombiano por medio de la Comisión Reguladora de Comunicaciones (CRC) definió el límite de cumplimiento del nivel de servicio (NS) mayor o igual al 80 %, dando alcance a todas las empresas de telecomunicaciones del país [1], el NS relaciona a todos los clientes atendidos con un tiempo de espera inferior a 15 minutos de espera sobre todos los clientes atendidos.

En algún momento todos esperaron para ser atendidos ya sea en un establecimiento de comercio, al cancelar un producto adquirido, pagar un recibo de servicios públicos, realizar un pago de una deuda en un banco, o al comprar un boleto de ingreso al cine, esto conlleva a que se elabora una cola o línea de espera, [2] entendiendo que las personas que están atendiendo no alcanzan a suplir la cantidad de personas que llegan en un instante de tiempo, este fenómeno no solo ocurre en la atención al cliente presencial, si no también pasan en la movilidad, llamadas telefónicas, consumos de información de servidores, entre otros.

Sin embargo, para el desarrollo del trabajo investigación estará centrado en el proceso de atención en una oficina de servicio presencial en una organización de telecomunicaciones, donde se realizan procesos de ventas de bienes y servicios, al igual de servicios de posventa, solicitudes de desactivación de servicio, etc.

El trabajo de investigación abordará todo lo relacionado a una línea de espera, el cual se espera identificar el método requerido para la organización.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ATENCIÓN

Con el fin de asegurar un adecuado servicio en los procesos de atención se cuentan con dos mecanismos de atención el primero es el de atención en los módulos convencionales y el segundo es el de atención App (Personal que aborda al cliente en la entrada de la oficina), el cual se describen a continuación.

II-A. Atención Barra

Los procesos de atención en los módulos están dirigidos a todos aquellos procesos con una alta complejidad de ejecución y su entorno tecnológicos (sistemas utilizados para su ejecución)

De acuerdo con la estrategia de la organización se tiene una categorización de atención, como se muestra en la Ilustración 1, a medida que los clientes llegan a la oficina de atención y según la necesidad, se le asigna un tipo de servicio de atención (Turno), sin embargo, hay algunos turnos que son priorizados ya sea por temas regulatorios (Atención Preferencial) [3] o necesidades Corporativas definidos de acuerdo a la siguiente nomenclatura.

Nomenclatura:

- Atención Preferencial: Son todas las atenciones que cubre el decreto 19 del 2012, las cuales tienen prioridad sobre todas las atenciones.
- Ventas: Son todos los procesos de ventas de bienes y servicios.
- Posventa: Proceso sobre servicios activos (Modificación de servicios, Plan, Sim Card, etc).
- Peticiones (PQR): Proceso relacionados a solicitudes y/o inconformidades sobre el bien o servicio.
- Otros Servicio: Servicios adicionales como servicio técnico, retomas (en el proceso de recibir el celular del cliente de acuerdo con su estado, se cambió por un bono monetarios para ser utilizado en la compra de un nuevo celular), configuras equipo, etc.

Para el llamado de atención de acuerdo con las prioridades se da de la siguiente manera:

- **Prioridad 1:** Son los turnos que sin importar la hora de llegada serán llamados por encima de todos los servicios en orden de llegada.
- **Ventas:** Son todos los procesos de ventas de bienes y servicios.
- **Prioridad 2:** Tendrá prioridad sobre la prioridad 3, 4, 5 el cual serán atendidos de acuerdo con el orden de llegada.
- **Prioridad 3:** será atendido por encima de las prioridades 4, y 5, de acuerdo con el orden de llegada.
- **Prioridad 4:** Será atendido sobre la prioridad 5 de acuerdo con el orden de llegada.
- **Prioridad 5:** serán atendidos si en el sistema no se encuentran ninguna de las prioridades 1, 2, 3, y 4 de acuerdo con el orden de llegada.

Para el proceso de atención todos los asesores en la oficina tienen una formación integral la cual permite atender cualquier servicio, asegurando que una vez sea terminada la atención de un cliente, pueda ser llamada el siguiente sin importar la categorización del servicio.

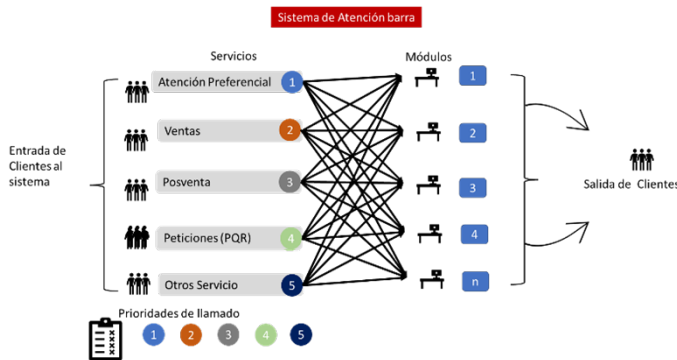


Figura 1. Categorización del proceso de Atención barra.

II-B. Atención APP

Para el proceso de atención App están dirigidos a aquellos procesos de baja complejidad de ejecución y no requieren un ambiente tecnológico complejo que puede ser resuelto mediante una Tablet y una información básica, este proceso de atención está relacionado a condiciones informativas o de consulta ya sea de la cuenta, plan, fecha de pago, o montos adeudados.

El proceso de atención se realiza de acuerdo con la ilustración 2, donde cuentan con un nivel de servicio aproximado al 99 %, todo cliente que requiera realizar un proceso de consulta será abordado por un consultor al ingreso de la oficina que atiende este servicio, de ser identificada la necesidad se realiza la generación del turno y su inmediata atención al cliente, así se tiene un tiempo de espera mínimo.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con el fin de poder abordar el trabajo de investigación es importante abordarlos desde las siguientes inquietudes:

¿Cuántos clientes pueden estar en espera permitiendo cumplir con el nivel de servicio exigido a nivel regulatorio?, es decir cuál sería la longitud de la cola?



Figura 2. Proceso de atención App.

¿Cuántos consultores serán necesarios para poder satisfacer la atención de los clientes que su tiempo de espera no supere los 15 min de espera?

¿Para ello es importante buscar los métodos que permitan identificar las variables asociadas a tiempos ociosos, pero será este un factor determinando que afecte el nivel de servicio?

¿Cuál es el máximo de consultores ausentes que puedo tener en el sistema sin atención?

Al igual, se consideran las variables adecuadas para la organización que permitan orientar la investigación, el cual se relacionan a continuación.

- Nivel de servicio.
- Nivel de ausentismo por Vacaciones
- Nivel de ausentismo por Incapacidad
- Nivel de operatividad del personal
- Tiempo Promedio de espera de los clientes
- Tiempo Promedio de Atención del cliente
- Tipo de Población
- Nivel de ocio del personal Operativo.
- Tasa de abandono.
- Cantidad de clientes
- Estado del cliente

Se realizó la selección de una oficina por cada una de las regiones que cuentan con el NS de servicio más bajo de acuerdo con el cumplimiento de la resolución como se relaciona en la Tabla I, que indica la cantidad de turnos atendidos, recibidos y el NS.

Tabla I
OFICINAS CON BAJO NIVEL DE SERVICIO.

Zona	Oficinas	Turnos Recibidos	Turnos Atendidos	NS
Zona 1	Oficina Barranquilla	13368	12468	73 %
Zona 2	Oficina Pereira	13832	12769	64 %
Zona 3	Oficina Palmira	9683	8827	53 %
Zona 4	Oficina Soacha	20275	18059	50 %
Zona 5	Oficina Villavicencio	6991	6657	67 %

IV. OBJETIVO

Establecer un método que permita conocer la cantidad necesaria de personal que requiere una oficina de atención al público para atender a los clientes, dando cumplimiento al nivel de servicio establecido.

IV-A. Objetivos Específicos

- Determinar factores influyentes en la atención del servicio
- Proponer una metodología que permita incrementar los niveles de servicio

- Establecer alternativas para la atención del acuerdo al servicio prestado.
- Identificar las condiciones que permitan dar cumplimiento al nivel de servicio definido.

V. APORTES

Es importante como se abordado el trabajo de investigación Aplicación de teoría de colas en entidades financieras [4], donde es necesario identificar cada una de las variables y realizar el proceso de comprobación de cada uno de sus datos, dentro de su estudio utilizo la prueba Kruskal-Wallis, método no paramétrico que permite identificar si un grupo de datos pertenecen a una misma población.

También es muy interesante como se aborda el proceso de colas en [5] “Passengers queue analysis in international airports terminals in Kerala using multiphase queuing system” que realiza el proceso de comparación en los diferentes aeropuertos de análisis y le permite identificar los grupos de población.

VI. ASPECTOS PARA CONSIDERAR

Es importante evaluar los datos con el fin de poder cumplir con las condiciones de ser una línea de espera o cola.

Sin embargo, el trabajo de investigación está al alcance, y permite identificar métodos potenciales solubles a su problemática, mediante la aplicación de estadística inferencial, probabilidad Aplicada [6].

En el trabajo de investigación se está contemplado las condiciones de ausencia de los trabajadores, en el caso de las vacaciones el 70 de la planta es directo es decir tendrá una ausencia de 15 días en el año [7], afectando la disponibilidad de personal para satisfacer de demanda de atenciones.

VII. RESULTADOS PRELIMINARES

Se realiza el Histograma de con el Software IBM Statistics, el cual permite evidencia que los datos de la muestra no se comportan a una distribución normal de forma normal de acuerdo con la Gráfico 3, tomando como base la muestra de la Tabla I.

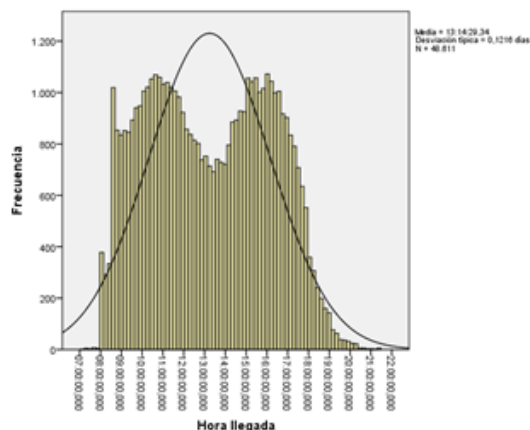


Figura 3. Histograma con Curva Normal

De acuerdo con la Tabla I para efectos de análisis de la información o datos recolectados de las 5 zonas se realiza el análisis de varianza o ANOVA y LEVENE que pretende identificar si existe relación entra las oficinas de las diferentes zonas

Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error^a

Variable dependiente: Tiempo Atención

F	gl1	gl2	Sig.
4,489	69	48540	,000

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos.

a. Diseño: Intersección + Día_Sem + Hora + Día_Sem * Hora

Figura 4. Resultado Inter-Sujeto Tiempo Atención por grupos Día Semana y Rango horas

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: Tiempo Atención

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	463156903 ^a	69	6712418,891	6,283	,000
Intersección	568431446,7	1	568431446,7	532,072	,000
Día_Sem	404059,576	4	101014,894	,095	,984
Hora	292266970,3	14	20876212,17	19,541	,000
Día_Sem * Hora	66331658,59	51	1300620,757	1,217	,138
Error	51856980959	48540	1068335,001		
Total	1,119E+11	48610			
Total corregida	52320137862	48609			

a. R cuadrado = ,009 (R cuadrado corregida = ,007)

Figura 5. Resultado prueba Levene sobre igualdad de varianzas Día Semana y Rango horas.

Statistics con el resultado de la significancia *Sig.*000, se puede indicar que no existe evidencia estadística suficiente para acepta la H_0 , por ende, indica que al menos un grupo no pertenece a la misma población,

REFERENCIAS

- [1] Comisión Reguladora de Comunicaciones “RESOLUCIÓN No. 5050 DE 2016”, vol. Art. 21515. 2016. [En línea]. Available: <https://www.crcm.gov.co/es/pagina/normatividad>
- [2] F. S. Hiller y G. J. Lieberman, INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES, vol. Novena edición. McGrawHill, 2010.
- [3] Departamento Administrativo de la Función Pública “Decreto 19 de 2012,” 2012.
- [4] F. A. Gómez Jiménez, “Aplicación de teoría de colasen una entidad financiera: herramienta para el mejoramiento de los procesos de atención al cliente.” *REVISTA Universidad EAFIT*, vol. 44, núm. 150, pp. 51–63, 2008.
- [5] R. Aniyeri y R. Nadar, “Passengers queue analysis in international airports terminals in Kerala using multiphase queuing system”, 2018. <https://doi.org/10.1504/IJMOR.2018.088566>
- [6] G. C. Canavos, “Probabilidad y Estadística Aplicaciones y métodos”, 1998.
- [7] Republica de colombia, “Código sustantivo de trabajo”, 1951. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_sustantivo_trabajo.html(consultado sep. 03, 2022).

A Survey of Homomorphic cryptography, ZPK, and zk-SNARK protocols for identity and privacy protection in Ethereum blockchain.

Jawy Andres Romero Pinto, Elvis Eduardo Gaona Garcia

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

jawaromerop@correo.udistrital.edu.co, egaona@udistrital.edu.co

Abstract—Account tracking in Ethereum is quite easy the wallet doesn't change its address dynamically, so this leads to problems of identity protection and account theft, what I want to expose is how to use new cryptographic protocols like zk-SNARKs to add a cryptographic layer. In this paper, we propose to improve Ethereum identity with cryptographic protocols such as zk-SNARKs and zpk.

Index Terms—Blockchain, Cryptographic, Ethereum, zk-SNARKs, ZPK

I. INTRODUCTION

IN this paper, we will analyze some commonly known attacks on the Ethereum blockchain, and how some public blockchains lack privacy protection and user accounts due to their decentralized nature. Identity protection is fundamental when minting or participating in a nfts marketplace, the idea is to propose the use of protocols such as zpk, zk-snarks, and even homomorphic cryptography, to protect identity in these blockchains when participating in an exchange. We will make a comparison between Homomorphic cryptography, zpk "Zero-knowledge proof" and zk-SNARK taking into account the new update of Ethereum 2 or the merge as it has been named in order to argue a zero-knowledge proof in asset transfers and identity protection in the Ethereum chain without losing the transaction reliability and most importantly its transparency within the blockchain, in the following sections we will verify its effectiveness in terms of data protection and performance between each of the protocols taking into account the service and the speed of the same, we present an example of an arithmetic circuit for the expression :

$$(a + b) * (b * c) \quad (1)$$

Preserving anonymity on the blockchain has become a priority issue, anonymity, and confidentiality is compromised with nodes exposing information to external agents. Although the blockchain was created for the benefit of transparency, public blockchains lack identity privacy, yet it uses cryptography and cryptographic algorithms as a basis with the use of different consensus in the transfer of data, In each node of the decentralized network a copy of a ledger is kept and distributed in the same way in all the nodes, this helps the data not to be corrupted by an adversary, another characteristic of this decentralized technology is that it is automatic and is not centralized or managed by a central entity [3].

We have been implementing decentralized technologies for a couple of years now, since 2009 when Satoshi Nakamoto's paper was launched [6], it is based on asymmetric cryptography or at least its cryptographic principles are defined in the blockchain, asymmetric cryptography uses a pair of public and private keys to encrypt and decipher the information to be shared so, on the other hand, we have symmetric cryptography that uses only one key to encrypt and decrypt [3], [5]. The public key is the user account that everyone can share, while the private key is unique and resembles a strong password, [6].

Currently, we have permissive and non-public blockchains, in this order of ideas, public networks allow the participation of any actor in the same as long as it is accessed through an electronic wallet that validates the same network and which in turn has an address that identifies it [8]. Currently, we have permissive and non-public blockchains, in this order of ideas, public networks allow the participation of any actor in the same as long as it is accessed through an electronic wallet that validates the same network and which in turn has an address that identifies it [8].

Type	Public	Private
	Decentralized	Mixed
What is it about?	Any user with a device and connection can participate.	Read and write privileges are controlled by the administrator.
Advantages	It is secure and transparent, all transactions are public and anonymous.	Private and Efficient validation of nodes and transactions is validated, access and write control.
Challenges	Speed and Efficiency	Centralized

Fig. 1. Blockchain types.

II. THE SECURITY OF THE BLOCKCHAIN SMART CONTRACT SYSTEM:

Smart contracts are portions of code that give an order in transactions within a blockchain, despite its decentralized nature blockchain presents security problems because it is supported on vulnerable technologies, but if that were not enough, within the Solidity code it already presents several vulnerabilities [1], [2]. The following table outlines the most critical vulnerabilities in the Ethereum network.

We will now show a technique used to exploit an existing vulnerability in the code environment, an adversary notices

Platform name	Vulnerability name	Vulnerability Type(s)	Published Data
Ethereum	Allocation of Resources Without Limits or Throttling	DoS	2018
Ethereum	NULL Pointer Dereference	DoS	2018
Ethereum	Deserialization of Untrusted Data	DoS	2019
Ethereum	Out-of-bounds Read	DoS+Inf	2018
Ethereum	Incorrect Authorization	Bypass	2018
Ethereum	Re-entrancy problem	The DAO attack	2016
Ethereum	Transaction ordering	No Data	No Data
Ethereum	Block timestamp dependency	No Data	No Data
Ethereum	Exception handling	The DAO attack, Integer Over/Under flow attack, King of Ether Throne attack	2016
Ethereum	Call stack depth limitation	No Data	No Data

Fig. 2. Vulnerabilities of Ethereum.

that there is a vulnerability between smart contracts, it is a function that allows to call the victim's contract and thus steal ETH "ethers, cryptocurrency"[1], [2], [3], [4].

```

1 pragma solidity 0.5.25;
2
3 contract HackVictim {
4     mapping(address => uint) balances;
5     function depositValues() payable {
6         balances[msg.sender] = msg.value;
7     }
8
9     function withdrawValues(uint amount) {
10        require(balances[msg.sender] >= amount);
11        msg.sender.transfer(amount);
12        balances[msg.sender] -= amount;
13    }
14 }

```

Fig. 3. Smart contract is vulnerable in terms of visibility and allows re-entry through the withdrawal values function.

III. HOMOMORPHIC CRYPTOGRAPHY

Homomorphic encryption algorithms have the ability to provide privacy of data in transit and at the same time be able to make calculations on them, this quality leads us to propose an encryption model with a layer of RSA on the Ethereum blockchain to safeguard the identity in public networks and leaving that in the Etherscan network where transactions can be observed for transparency issues without affecting the identity of the participants in the network, let's remember that if we are dealing with private data that we do not want them to be centralized by some authority, but we also do not want them to be exposed to the public because they are private in all their nature. That is to say that in applications we already see the use of nodes to store DNA chains, and we are talking about only this example of hundreds of examples that already exist, so we can provide basic data of our DNA chain for medical studies, but it would not be good for it to be known whose it is. We suggest this encryption methodology to safeguard identity in public networks while maintaining transparency in decentralized network transactions [3][8]. For these tests we use an open source library, a subset of NumPy tools generally used by data scientists to use fully homomorphic FHE encryption, Concrete-numpy.

```

import concrete.numpy as hnp

def add(x, y):
    return x + y

inputset = [(2, 3), (0, 0), (1, 6), (7, 7), (7, 1), (3, 2)]
compiler = hnp.NPHECompiler(add, {"x": "encrypted", "y": "encrypted"})

print(f"Compiling...")
circuit = compiler.compile_on_inputset(inputset)

examples = [(3, 4), (1, 2), (7, 7), (0, 0)]
for example in examples:
    result = circuit.encrypt_run_decrypt(*example)
    print(f"Evaluation of {' ' + '.join(map(str, example))}")

```

Fig. 4. Library hnp

IV. ZK-SNARKS AND ZPK FOR AUTHENTICATION

Now, analyzing the protocol that came out in May 2022 for identity protection in the Ethereum-based zcash network, this blockchain was the first to implement the zk-SNARK protocol a new form of zero-knowledge cryptography, this means that it can fully encrypt the blockchain and still be able to verify that transactions are valid within the blockchain, zk-SNARK stands for "zero-knowledge non-interactive succinct knowledge argument", and following an encryption methodology for identity protection in public blockchain this protocol can be implemented as an additional layer for transactions or cryptoasset exchange [8], [9].

Computing $\rightarrow$ Arithmetic Circuit $\rightarrow$ R1CS $\rightarrow$ QAP $\rightarrow$ zk-SNARK $\rightarrow$ zk-SNARK. ZPK complements the proposed methodology with an authentication cipher, plays an important role in identity privacy when you do not want to disclose to another user within the blockchain, which guarantees us anonymity and transparent transactions within the blockchain, [8].



Fig. 5. image take zcash.org

V. PRELIMINARY RESULTS, PROOFS OF CONCEPT WITH SOLIDITY AND ZOKRATES A LIBRARY USING ZPK.

We use functions that enter data into memory in order to validate the test result in the smart contract "verifier.sol", it turns out that the result of the zero test, along with its curve, scheme, in json format, did work:

We use the zokrates library and some examples of it to do the tests in the verifier.sol contract, this to cover the data encryption with Zero Knowledge Proofs (ZPK), it remains for

```
function addition(G1Point memory p1, G1Point memory p2) internal view returns (G1Point me
uint[4] memory input;
input[0] = p1.X;
input[1] = p1.Y;
input[2] = p2.X;
input[3] = p2.Y;
bool success;
assembly {
    success := staticcall(sub(gas(), 2000), 6, input, 0xc0, r, 0x60)
    // Use "invalid" to make gas estimation work
    switch success case 0 { invalid() }
}
require(success);
}
```

Fig. 6. . Function on remix.ethereum.org

```
{
  "scheme": "g1b",
  "curve": "bn128",
  "proof": {
    "a": [
      [
        "0x1c2d68bbda567b815a08d9f88f1d5236ebfd13a1da34c96156968f8c7fd201c",
        "0x07ac0f250a508623a5b6a58a77762b4ed8b2ca4a7c359d1fbc41fe9e07df7058"
      ]
    ],
    "b": [
      [
        "0x0a82f78a81b45639ab70cd73b477f5fe9e560c3aaa2904b325c432903442a957",
        "0x176aa963f3f88a4580ffc32024bb7c45f59c9200490711947320d8bd349bfbd0"
      ]
    ],
    "c": [
      [
        "0x25793c6e87806515d0d3496e4aa958b6339622f678dd67e652a3c7c3e6f57e7a",
        "0x2fdd31a4c055212ed9e77964cc23e09f6f570e9a511b2bfd6c59a37e84e6cb3"
      ]
    ]
  },
  "inputs": {
    "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000"
  }
}
```

Fig. 7. Proof on remix.ethereum.org format json.

Generates a proof for a computation of the compiled program using proving key and computed witness.

☒ Generate

Verifier inputs:

[[{"0x1c2d68bbda567b815;

☒ Proof generated!

Fig. 8. Proof generate.

the other researchers to do the integration of the Homomorphic encryption and zkSnark. We deliver all the time our confidential information through our smartphones, but there is another way to protect the information, and that is using these new technologies and new protocols for data encryption.

REFERENCES

[1] TY - JOUR AU—Ndiaye, Malaw AU - Konate, Karim Y—2022/05/16 SP—T1—Security Strengths and Weaknesses of Blockchain Smart Con-

tract System: A Survey ER.

[2] Alessandro Brighente, Mauro Conti Fellow, IEEE, and Sathish Kumar Senior Member, IEEE, Exploiting Smart Contract Vulnerabilities

[3] Aisha Zahid Junejo, Manzoor Ahmed Hashmani, Abdullah Abdulrehman Alabdulatif, Mehak Maqbool Memon, Syeda Rabeca Jaffari, M. Nasir B. Abdullah, RZee: Cryptographic and statistical model for adversary detection and filtration to preserve blockchain privacy, Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences,2022,

[4] Muneeb Ul Hassan, Mubashir Husain Rehmani, Jinjun Chen, Privacy preservation in blockchain based IoT systems: Integration issues, prospects, challenges, and future research directions, Future Generation Computer Systems, Volume 97, 2019, Pages 512-529, ISSN 0167-739X, <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.060>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18326542>)

[5] Subhadeep Koley, A feature adaptive image watermarking framework based on Phase Congruence and Symmetric Key Cryptography, Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences, Volume 34, Issue 3, 2022, Pages 636-645, ISSN 1319-1578, <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.03.002>

[6] Nakamoto, S. (2008) Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>

[7] Rohaila Naaz, Ashendra Kumar Saxena, Chapter 14—A study of bitcoin and Ethereum blockchains in the context of client types, transactions, and underlying network architecture, Editor(s): Prashant Johri, Adarsh Anand, Jüri Vain, Jagvinder Singh, Mohammad Quasim, In Emerging Methodologies and Applications in Modelling, System Assurances, Academic Press, 2022, Pages 229-269, ISBN 9780323902403, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90240-3.00014-X>.

[8] Fursan Thabit, Ozgu Can, Sharaf Alhomdy, Ghaleb H. Al-Gaphari, Sudhir Jagtap, A Novel Effective Lightweight Homomorphic Cryptographic Algorithm for data security in cloud computing, International Journal of Intelligent Networks, Volume 3, 2022, Pages 16-30, ISSN 2666-6030, <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2022.04.001>.

[9] Thomas Chen , Hui Lu , Teeramet Kunpittaya , and Alan Luo, A Review of zk-SNARKs, <https://arxiv.org/pdf/2202.06877.pdf>

Non-Linear Programming and Queueing Network Approach for the Vaccination Process in Colombia

Franco, C¹, Herazo-Padilla¹, Castañeda, J.²,

carlosa.franco@urosario.edu.co, nilson.herazo@urosario.edu.co, jacasta2@gmail.com

Abstract—We consider the problem of vaccination process in Colombia where two main decisions must be taken: schedule the patients to be vaccinated and the capacity planning to guarantee the service level required considering the space and human resources constraints. The process analyzed is for the COVID-19 operation which change the regular process of vaccination. We propose two mathematical approaches based on queueing networks a M/M/S model and G/G/S model. We use a three-step COVID-19 vaccination process observed in a healthcare provider in Bogotá, Colombia, as the base case of our modeling approach. To test the models, we propose three objective functions and analyze different configurations of the process that correspond to various levels of relevant model parameters. To assess the computational performance of the models, we also experiment with larger instances in terms of number of process steps and number of patients.

Index Terms—Vaccination, Non-Linear Programming, Queueing Networks.

I. INTRODUCTION

VACCINATION centers are locations set up to immunize large numbers of people within short time frames. The final aim of setting up vaccination centers is to accelerate disease control through a rapid increase in vaccination coverage. However, this goal may not be attainable without proper vaccine distribution to vaccination centers and effective vaccine application [1]. In this context, the main objective to guarantee a desirable service level, planning and managing the capacity of vaccination centers is a step to satisfy these requirements.

Several decisions must be taken when planning and managing vaccination centers, these elements are related to the location and layout of the center, the number and type of staff and the required performance to achieve given vaccination quantity targets, among others [1]. When implementing the new COVID-19 vaccination centers, some of these decisions are also analyzed. For example, Signorelli et al. [2] presented the implementation of a “vaccine islands” model where COVID-19 vaccines were applied in up to 10 “islands”, each with two vaccination modules, divided into two parallel rows of five separated by a central corridor. This setup allowed to administer up to 6,000 shots per day while reducing the overall time a patient spent in the whole process and crowds. Similarly, Yogeve et al. [3] presented the implementation of a COVID-19 vaccination site where six vaccination modules

were organized in a C shape with the vaccine preparation module at the heart of the C. This setup allowed a productivity of 147 shots per hour while improving control and supervision of vaccine administration, patient flow, dose preparation burnout and safety.

Our work develops a mathematical modeling framework that generalizes patient scheduling and resource allocation decision-making for vaccination centers considering congestion and workload constraints. The base case is a three-step COVID-19 vaccination process observed in a healthcare provider in Bogotá, Colombia. In this process, the personal information of a patient is verified, she is vaccinated and, finally, her personal and vaccination information is registered in a governmental platform. All COVID-19 vaccination centers in Colombia follow this same three-step vaccination process, though in different scales. We first present an open Jackson Network model that captures the overall structure of this three-step vaccination process. Then, we further generalize the Jackson Network model by relaxing its interarrival and service time distributions assumptions with a G/G/m model, i.e., a Generalized Queueing Network model. We experiment with both models to analyze the impact of different parameter configurations on patient scheduling and resource allocation decisions and on congestion and workload performance metrics.

II. MATHEMATICAL APPROACH AND RESULTS

Patients arrive to the first station named registration according to a Poisson process where there are not no-show probabilities. The servers which work in parallel follows an exponential distribution with known mean. Given that the model does not consider deferral or no-show probabilities, thus the arrival times are equals.

The first model corresponds to a nonlinear mathematical Jackson Network composed of a set O of different stations, where each station represents a service provider. There are totally n patients to be scheduled in a day of H hours. The decision maker needs to define the following parameters: the minimum percentage of patients served per day (denoted by α), the minimum and maximum occupation or utilization (in percentage) of each station, and the maximum patient waiting time in queue and number of patients in queue in each station. The random parameters are related to the service time and service rate in each station.

The decision variables are the frequency of patients scheduled per hour λ , the number of servers assigned to each station,

¹ Franco, C. and Herazo-Padilla are with Universidad del Rosario (School of Management and Business). Emails: [carlosa.franco, nilson.herazo]@urosario.edu.co.

² Castañeda, J. is data scientist. Email: jacasta2@gmail.com.

the probability of idle time in a specific station and the average number of patients in queue in each station.

Given that Model 1 follows the M/M/s queueing model assumptions, we propose a second model with nonexponential interarrival and process time distributions, i.e., a G/G/m model. We have analyzed three different objective functions: the minimization of total number of servers assigned, the maximization of the number of patients scheduled and the balance between these two objectives.

III. RESULTS

For the first model, results in Fig. 1 shows, the number of servers for Station 1 is the same among OF1 and OF3 (2 servers), while OF2 leads to 3 servers. OF2 also leads to the best performance metrics. It is natural to conclude that increasing the number of servers, as OF2 does for Station 1, reduces the average utilization rate, the average patient waiting time in queue and the average number of patients in queue, as shown by the results of Station 1 in Figures 1 and 2. The model solved with OF3 leads to the largest values for the performance metrics (i.e., poorer results) due to the balance between the first two objective functions sought with OF3.

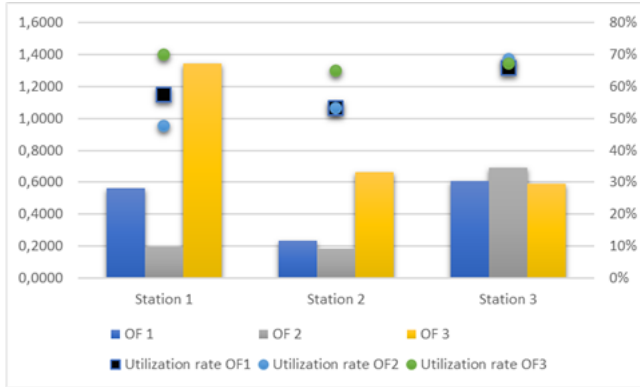


Fig. 1. Average number of patients in queue and utilization rates.

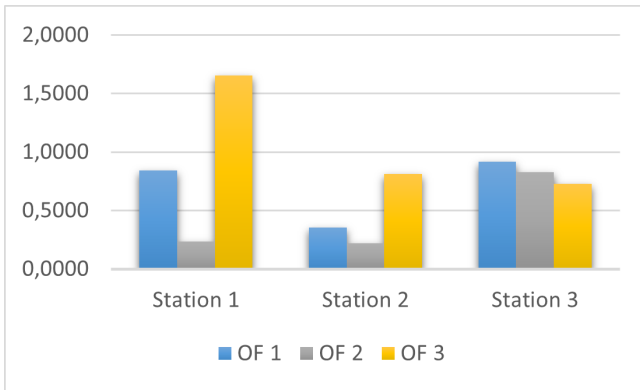


Fig. 2. Average patient waiting time in queue (min).

The results of the second model (G/G/M) corresponds to the average number of servers for each objective function and for each number of stations, where in general, the results obtained with OF1 (a) and OF3 (c) present a smaller number

of servers compared to OF2 (b), and the ranges with OF1 are the smallest. Within OF1 (a) and OF2 (b), the average number of servers is similar over the number of stations. For OF3 (c), the number of servers is quite similar over the number of stations, except for the 10-station instances whose values are higher. If we contrast these results, the ranges with Model 2's OF2 increase with the number of stations. Additionally, the results with Model 2's OF3 show some heterogeneity given the peak in the number of servers for the 10-station instances.

IV. CONCLUSIONS

Our work studied the join problem of (i) capacity planning with multiple and sequential stations and multiple servers within each station and (ii) patient scheduling, where the service times and patient arrivals are assumed to be stochastic. The problem was modeled through two different approximations: an open Jackson Network model and a Generalized Queueing Network model, and for each of them we tested three different objective functions that allowed us to analyze different system configurations.

REFERENCES

- [1] Gianfredi, V., Pennis, F., Lume, A., Ricciardi, G. E., Minerva, M., Riccò, M., Odone, A., & Signorelli, C. (2021). "Challenges and Opportunities of Mass Vaccination Centers in COVID-19 Times: A Rapid Review of Literature. *Vaccines*", 9(574), 1–20
- [2] Signorelli, C., Odone, A., Gianfredi, V., Capraro, M., Kacerik, E., Chiecca, G., Scardoni, A., Minerva, M., Mantecca, R., Musarò, P., Brazzoli, P., Basteri, P., Bertini, B., Esposti, F., Ferri, C., Alberti, V. A., & Gastaldi, G. (2021). "Application of the "immunization islands" model to improve quality, efficiency and safety of a COVID-19 mass vaccination site." *Annali Di Igiene: Medicina Preventiva e Di Comunita*, 33(5), 499–512. <https://doi.org/10.7416/ai.2021.2456>
- [3] Yogeve, D., Burlak, K., Tabak, N., Fink, N., Karp, E., & Segal, D. (2021). "An Insight on the Arrangement of a Remote Military COVID-19 Vaccination Site." *Military Medicine*, 186(7–8), 201–202. <https://doi.org/10.1093/milmed/usab089R>
- [4] Fardel, M., Nagel, F., Nuesch, T., Lippert, and A. Wokaun. "Fabrication of organic light emitting diode pixels by laser-assisted forward transfer." *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 6, Aug. 2007, Art. no. 061103.

Development of a low-cost monitoring system based LoRaWAN IoT for small wind turbine energy production.

Andrés Camilo López García, Héctor Guillermo Parra Peñuela, Elvis Eduardo Gaona Garcia
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
anclopezg@correo.udistrital.edu.co, hgparrap@udistrital.edu.co egaona@udistrital.edu.co

Abstract—The energy production monitoring system for wind generators was developed through the implementation of a LoRaWAN network which allowed the reading of frequency and rms voltage, the calculation and visualization of energy production in kilowatts through the construction of a balanced three-phase load circuit and the acquisition of signals through embedded systems and IOT modules, these data are sent to an IOT web platform. The API of the IOT web platform is queried to obtain the raw data, these are cleaned, characterized and normalized to be stored in a relational database, the rate of measured records was one minute, for the automation of this storage process was configured a regular manager of background processes of Unix operating systems called cron, which allows the execution of a bash file associated with script in Python every ten minutes. The data storage server was hosted in the infrastructure of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas and was accessed via SSH protocol, and then displayed on a Web dashboard using free software based on Apache 2.0 license.

Index Terms—HAWT, LoRaWAN, Power monitoring, Grafana, MySQL.

I. INTRODUCTION

ENERGY production from wind resources in Colombia has been strengthened through studies and constant developments such as the installation of large capacity wind farms in the department of La Guajira, installation of hybrid microgrids in non-interconnected areas [1], among others, in Currently there are government information platforms in which it is possible to consult the history of winds throughout the national territory since 2018 [2] as well as several works in the development of new bio designs inspired by the creation of new turbine [3].

This document consists of the process of implementation of a monitoring system or data acquisition such as tension [4], frequency and 3D Wind speed, using an ultrasonic anemometer sensor and LoRaWAN network [5], [6] to be observed and stored on the server. query linked to a free viewing platform such as Grafana [7].

II. METHODOLOGY

This section shows the proposed methodological diagram and for the creation of the energy production monitoring system, the diagram consists of three phases described below: Development Phases.

In research work of [8] there are definitely four phases within the methodology and it is decided to take three of them for this research work, which start with a phase one of research from which a design phase is derived, later in the Prototype phase that in this work is the development and finally an analysis is taken and the result is the visualization and testing, this article is taken as a reference due to the proximity and implementation of hardware and software.

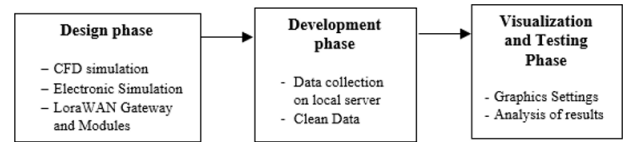


Fig. 1. Development Phases.

A. Design Phase

In this phase, the mechanical design is generated for the location of two 400W wind turbines and a 3D ultrasonic anemometer using 6m masts in the municipality of Cajicá in the department of Cundinamarca - Colombia, the Aerodynamic simulation [9], is created using CFD to perform a location that will avoid turbulent interference and a simulation of the circuit for the test bench capable of conditioning the electrical signals and being able to measure voltage and frequency, the selection of RAK and Gateway LoRaWAN modules and their configuration modes for the data link are also made.

To generate the data network of the monitored variables, an exploration of types of technologies was carried out, LoRaWAN networks [10], and their equipment being the most developed currently in the world due to their rapid configuration, flexibility, and low cost.

After consulting on the use of LoRaWAN technology, the data flow is designed using a network diagram shown in Figure 4.

In the green section there is the obtaining of data directly from the environment which are taken to the platform "The Things Network" and consumed by the server from an API "Storage Integration", the yellow section refers to the Server that collects the data and a process of cleaning and adaptation of the data is developed to be exposed in Grafana. The architecture of the table "tabla_dataaf" within the Database

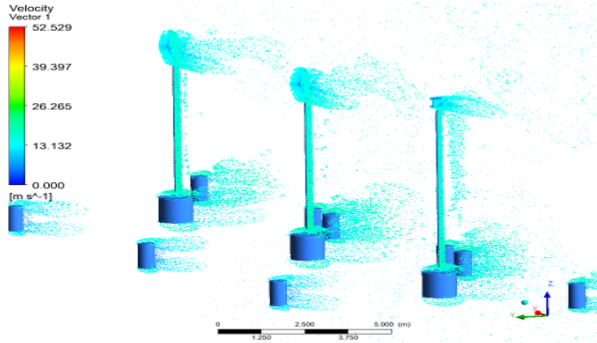


Fig. 2. Above CFD and Electronic Simulation and Below Selected Gateway and RAK Modules- a) Physical structure of the Gateway Rak7258 - b). Rak811 module evaluation board

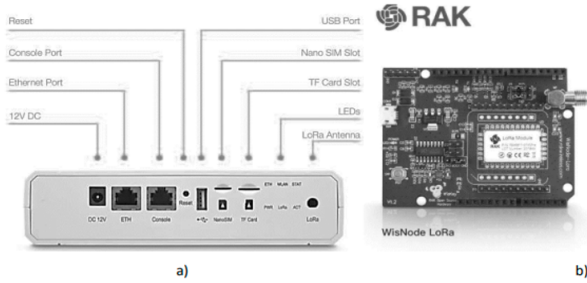


Fig. 3. Gateway and RAK Modules - a) Physical structure of the Gateway Rak7258 - b). Rak811 module evaluation board

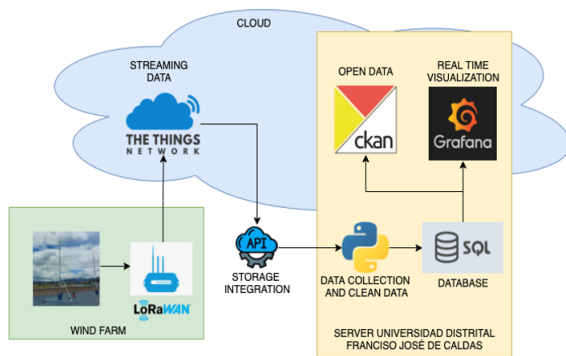


Fig. 4. Network Diagram.

"data1" defined within the server to store the data brought from the Thing Network is presented below, figure 5.

The ID is the unique identifier of each record, that is why it is defined as the Key and it is auto_increment so as not to have to define it in each insert made, but that the table automatically assigns a unique id. The Voltage (V_G1 and V_G2) and Frequency (FR_G1 and FR_G2) data arrive

Field	Type	Null	Key	Default	Extra
id	int(11)	NO	PRI	NULL	auto_increment
V_G1	float	YES		NULL	
FR_G1	float	YES		NULL	
P_AT	float	YES		NULL	
EG1	float	YES		NULL	
V_G2	float	YES		NULL	
FR_G2	float	YES		NULL	
P_AT2	float	YES		NULL	
EG2	float	YES		NULL	
fecha	datetime	YES		NULL	

Fig. 5. Table in Database.

directly from the platform, for this cleaning process they are only defined as a floating type variable and what is read from the JSON obtained with the API is assigned to it, G1 and G2 are the two Generators. The powers are the result of an operation dependent on the variable V_G1 and V_G2 and the quantities of electrical energies are defined as the integral of the power:

$$W_{in} = \int_0^t P_{in} dt = \int_0^t I^2 R dt \quad (1)$$

Power Equation (1) in three-phase 100 ohms balancing resistors.[11]

Ten samples and multiplied by the period of ten minutes to have an approximation of the integral of the Power. The processes of obtaining data through the API, connection to the database created in the MySQL server, data cleaning and construction of new data is carried out in Python, this script is executed every ten minutes in the server's Cron by means of a bash file.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Development phase

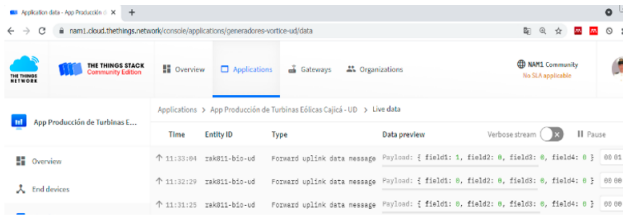
In this phase, the construction of the mechanical supports or masts and the development of the measurement circuits are carried out through the use of two three-phase resistive loads of 300W in star connection, which are connected to an embedded system that is responsible for the Analog conversion digital through ADC and then be transmitted serially to the LoRaWAN - RAK® modules which are linked to the Gateway, it should be noted that a module was used for the HAWT turbine production measurement circuit and another module with the same characteristics for the anemometer sensor.

Figure 6 shows the place of installation of the structures of the two wind turbines and the 3D WindMaster Pro-GILL ultrasonic sensor [12], these were installed on the terrace of the PHASE-II laboratory building of the new granada military university campus Cajicá campus, with safety measures and electrical protection from atmospheric discharges.

The information is sent between a 1 to 2 min difference between measurements to the IOT platform: *The Things Network*®, in which an application is configured for each RAK module, one to measure the energy production of the generators.



Fig. 6. Wind turbines and Sensor installed.



(Data streaming)

Fig. 7. IoT platform: The Thing Network.

Figure 7 shows the data flow in the IOT platform [13], in the fields the voltage and frequency measured values of the two wind turbines are observed respectively, these data are captured and stored in a server using the available application programming interface. on the platform with the name of Storage Integration which allows storing this data on a local server using Python statements figure 8.

```
import json
import requests
from datetime import datetime

Application = "generadores-vortice-ud"
APIKey = ""
Fields = "up.uplink_message.decoded_payload,up.uplink_message.frm_payload"
NumberOfRecords = 10
Fecha = "2021-08-20T00:00:00Z"
URL = "https://nam1.cloud.thethings.network/api/v3/as/applications/" +
Application + "/packages/storage/uplink_message?order=-received_at&limit=" +
str(NumberOfRecords) + "&field_mask=" + Fields
Header = { "Accept": "text/event-stream", "Authorization": "Bearer " + APIKey }
print("\n\nFetching from data storage...\n\n")

r = requests.get(URL, headers = Header)
JSON = "{\n\"data\": [" + r.text.replace("\n\n", ",")[:-1] + "]}";

url = ("URL: {}".format(r.url))
status = ("Status: {}".format(r.status_code))
texto = ("Response: {}".format(r.text))
data = json.dumps(json.loads(JSON), indent = 4)
data = json.loads(data)
json = data["data"]
```

Fig. 8. API: Storage Integration.

B. Visualization and Testing Phase

In this phase, the construction of the monitoring station visualization platform is shown, it seeks to generate an intuitive environment that allows users to consult and visualize the monitored data or Data sets, figure 9.

Grafana is a popular open-source time-series data query, visualization, and alerting tool which was developed by Torkel Ödegaard in 2014. It has a data source model which is

highly pluggable and supports multiple time-series-based data sources like Prometheus, InfluxDB, and OpenTSDB as well as SQL databases like MySQL and Postgres. Independent of where the data is stored, it allows you to query the data using a query editor, visualize it using dashboards, and alert on it using the alerting function.

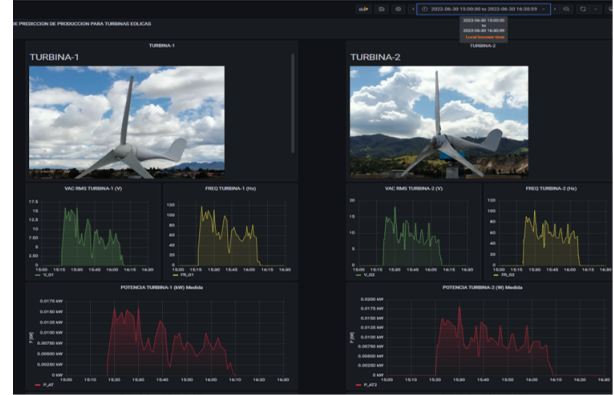


Fig. 9. Monitoring Platform Section implemented for Wind Turbine 1 and Wind Turbine 2.

Figure 9 shows the data obtained on 06/June/2022, currently variables such as voltage (green) and frequency (yellow) are being monitored to calculate the power (red), in the future more sensors will be installed to perform the characterization and prediction of energy from the available wind resource

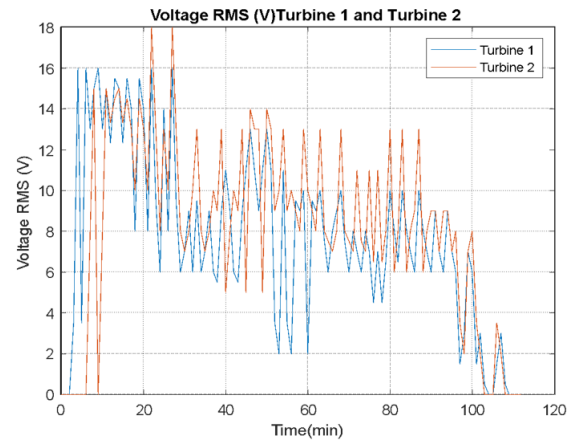


Fig. 10. Voltage RMS Turbine 1 and Voltage RMS Turbine 2 monitored.

Figure 10 shows comparatively the RMS voltage signals acquired from the wind turbines or turbine 1 and turbine 2, the blue signal is associated with a 400 Watts Pikasola Wind Turbine, without mechanical modifications in its blades, turbine 2 was modified with vortex generators on the blades surface, With equal wind speeds in the two turbines, the voltage curves show that turbine 2 with vortex generators presents higher RMS voltage peaks in increases in wind speed magnitude of up to 20% with respect to the turbine without modifications or turbine 1. For decreases in wind speed, turbine 1 shows lower values in RMS voltage peaks, although not at all points measured.

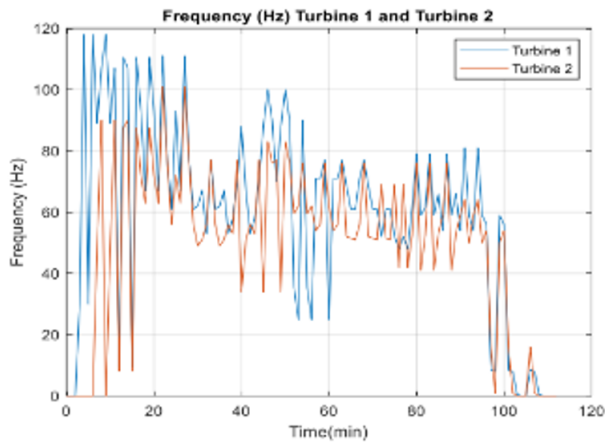


Fig. 11. Frequency Turbine 1 and Frequency Turbine 2 monitored

Figure 11 shows comparatively the frequency signals acquired from the sinusoidal voltage signals of the wind turbines or turbine 1 and turbine 2, blue signal is associated with turbine 1, which presented lower value in some of the frequency peaks of the RMS voltage signal with respect to turbine 2, indicating that having higher wind speeds generates an increase in the rotation visible in the increase of the electrical frequency and also the value RMS voltage magnitude measured as seen in the first data of Figure 10.

IV. CONCLUSIONS

The acquisition system implemented through low-cost embedded systems and IoT modules managed to measure the rms voltage and the frequency of the wind turbines installed in the Cajicá-Cundinamarca area, allowing the power and electrical energy generated to be calculated through a sampling time of one second. and sending the average of the samples to the server approximately every minute, to be able to be monitored and later analyzed.

REFERENCES

- [1] Al-Fatlawi, A. W., Al-Baghdadi, M. A., Togan, H., Ahmadi, G., Rahman, S., & Rahim, N. A. (2022). Techno-economic Analysis of Wind Turbines Powering Rural of Malaysia. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 413–421. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43477>
- [2] Datos de Viento Ideam Colombia | Dataset Suggestions | Datos Abiertos Colombia. (n.d.). Retrieved September 19, 2021, from <https://www.datos.gov.co/en/nominate/8542>
- [3] Bodling, A., & Sharma, A. (2019). Numerical investigation of noise reduction mechanisms in a bio-inspired airfoil. *Journal of Sound and Vibration*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.02.004>
- [4] Gunawan, T. S., Yaldi, I. R. H., Kartiwi, M., Ismail, N., Za'bah, N. F., Mansor, H., & Nordin, A. N. (2017). Prototype design of smart home system using internet of things. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 7(1), 107–115. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v7.i1.pp107-115>
- [5] LoRaWAN® | The Things Network. (n.d.). Retrieved September 19, 2021, from <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/>
- [6] Petinrin, J. O., & Shaaban, M. (2012). Overcoming challenges of renewable energy on Future Smart Grid. *Telkomnika*, 10(2), 229–234. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v10i2.148>
- [7] Grafana® Features | Grafana Labs. (n.d.). Retrieved September 19, 2021, from <https://grafana.com/grafana/>

- [8] Chee Ken Nee, Rafiza Abdul Razak, Muhamad Hariz Bin Muhamad Adnan, Wan Fatin Liyana Mutalib, Nur Fatirah Roslee and Noor Mursheeda Mahyuddin. (2022), Design and Development of Face Mask Reminder Box Technology using Arduino Uno. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications(IJACSA)*, 13(7). <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.0130713>
- [9] Beabpimai, W., & Chitsomboon, T. (2019). Numerical study of effect of blade twist modifications on the aerodynamic performance of wind turbine. *International Journal of Renewable Energy Development*, 8(3), 285–292. <https://doi.org/10.14710/ijred.8.3.285-292>
- [10] Bovo, M., Benni, S., Barbaresi, A., Santolini, E., Agrusti, M., Torregiani, D., & Tassinari, P. (2020). A Smart Monitoring System for a Future Smarter Dairy Farming. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, MetroAgriFor 2020 - Proceedings, 165–169. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor50201.2020.9277547>
- [11] Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2000). *CIRCUITOS ELÉCTRICOS Introducción al Análisis y Diseño*. 998.
- [12] Gill Instruments Ltd. (2017). User Manual: 3 Axis Ultrasonic Anemometers. 1210-PS-00, 1–55. www.gillinstruments.com
- [13] Jitendra Rajendra Rana. (2020). Review of LoRa WAN and its Application. *International Journal of Engineering Research And*, V8(12). <https://doi.org/10.17577/ijertv8is120381>