

$\mathcal{DIFU}_{100}ci@$, Revista de Difusión Científica

Ingeniería y Tecnologías

Vol: 17

Num: 2

Publicación: Mayo - Agosto 2023

ISSN: 2007-3585

Una publicación de la Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

Directorio

Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

Dr. Rubén de Jesús Ibarra Reyes, *Rector*

Dr. Ángel Román Gutiérrez, *Secretario General*

M.C. Hans Hiram Pacheco García, *Secretario Académico*

Dr. Carlos Francisco Bautista Capetillo, *Coord. Investigación y Posgrado*

Editor en Jefe

Víktor Iván Rodríguez Abdalá, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Editores Asociados

Manuel Hernández Calviño, *Universidad de La Habana*, (Cuba)

José Ricardo Gómez Rodríguez , *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Grupo Revisor

Jorge Flores Troncoso, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Remberto Sandoval Aréchiga, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Salvador Ibarra Delgado, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Juvenal Villanueva Maldonado, *CONACyT-UAZ*, (México)

Jorge Simón Rodríguez, *CONACyT-UAZ*, (México)

Rodrigo Daniel Méndez Ramírez, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*, (México)

Leonardo Acho Zuppa, *Universidad Politécnica de Catalunya*, (España)

Miguel Ándres, *Universidad de Valencia*, (España)

José Ángel González Fraga, *Universidad Autónoma de Baja California*, (México)

Ramón Parra Michel, *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN*, (México)

Leonel Soriano Equigua, *Universidad de Colima*, (México)

José Luis Álvarez Flores, *Universidad de Colima*, (México)

Fermín Marcelo Rubén Maciel Barbosa, *Universidad de Colima*, (México)

Francisco Rubén Castillo Soria, *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*, (México)

Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Juan Pablo Morales Álvarez, *Instituto Tecnológico de La Paz*, (México)

Daniel Armando Hirles Valles, *Instituto Tecnológico de La Paz*, (México)

Jaime Sánchez García, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*, (México)

Salvador Villarreal Reyes, *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*, (México)

Ernesto García Domínguez, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Rafael Villela Varela, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Jorge de la Torre y Ramos, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Manuel Reta Hernández, *Universidad Autónoma de Zacatecas*, (México)

Derechos reservados

Editorial

Universidad Autónoma de Zacatecas
"Francisco García Salinas"

Diseño de revista

Víktor Iván Rodríguez Abdalá
José Ricardo Gómez Rodríguez

Derechos Reservados

Universidad Autónoma de Zacatecas
"Francisco García Salinas"

ISSN 2007-3585

DIFU100ci@ (léase difuciencia) es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Autónoma de Zacatecas, "Francisco García Salinas", a través de la Unidad Académica de Ingenieráa Eléctrica. Jardín Juárez No. 147, Colonia Centro, Zacatecas, Zacatecas, C.P. 98000. Tel. (01 492) 925 6690.
Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-060212215100-203, ISSN: 2007-3585, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor.
Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.
Queda extrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas" a través de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.

http://www.uaz.edu.mx
http://difu100cia.uaz.edu.mx
difu100cia@uaz.edu.mx

Portada: www.seguritecnia.es
Plantilla de revista: ElegantLaTeX
Plantilla de artículos: Wenneker Article

Carta del editor



El Internet de las Cosas es una tecnología que permite que dispositivos simples se conecten a Internet para el envío de datos, que pueden ser desde una variable física hasta una coordenada geográfica en tiempo real, cumpliendo requisitos como tamaño pequeño, bajo consumo de batería y bajo costo.

El principal objetivo del Internet de las Cosas es lograr que los dispositivos se puedan conectar siguiendo el precepto de en cualquier momento y en cualquier lugar, para ello se pueden tener dos enfoques, uno desde el dispositivo, el cual deberá tener una gran variedad de radios que le permitan conectarse a través de diferentes medios, que pueden ser desde Bluetooth hasta satelital. El reto de este enfoque es el consumo de energía y el tamaño del dispositivo, ya que todos los radios no se van a utilizar al mismo tiempo o puede ser que no sean necesarios algunos en específico.

El otro enfoque está relacionado con el proveedor de servicio, ya que este tiene que buscar los medios para ofrecer una cobertura global, estable y confiable. Esto permitirá que los dispositivos tengan sólo un radio y así asegurar que sea de tamaño reducido y bajo consumo de energía.

El reto de este enfoque es como cubrir la mayor área posible con el menor costo de despliegue de la red, una alternativa es el uso de satélites conocidos como CubeSat, este tipo de satélites permiten que la carga útil sea un radio para Internet de las Cosas y así tener una cobertura global. Otra alternativa es mejorar la capa física o de acceso al medio para incrementar la cobertura u optimizar otro parámetro importante como el consumo de energía.

Es por ello, que el Internet de las Cosas es una tecnología que no ha terminado de evolucionar, la cual se está adaptando de forma constante a los nuevos retos de comunicación como de procesamiento de datos, buscando de esa forma disminuir su dependencia de la nube. Los retos venideros no solo se limitan al envío de datos, sino que buscan incluir tendencias como la Inteligencia Artificial en los dispositivos.

Finalmente, las oportunidades de proyectos de investigación en esta área va a fomentar el desarrollo de dispositivos inteligentes autónomos con gran cobertura para el monitoreo y vigilancia remota, con grandes ventajas para el consumidor, sentando así las bases de una nueva plataforma con enfoques y objetivos diferentes a lo que conocemos hoy como Internet de las Cosas.

Víktor Iván Rodríguez Abdalá

Editor en Jefe

Índice general

Directorio I

Derechos reservados II

Carta del editor III

1. **A miniature IoT-based Ground Station at 433 MHz for reception of telemetry packets from LoRa satellites** 1

2. **Directed Self-assembly of Colloidal Particles on a Blue Phase I Interface** 7

3. **Estrategias de interpolación para la planificación de trayectorias en un robot SCARA de 2 GDL** 14

4. **Nodo IoT para monitoreo del estado de un módem satelital** 24

$\mathcal{DIFU}_{100}ci@$
Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías
Vol. 17, No. 2, Mayo - Agosto 2023
ISSN:2007-3585
Artículo arbitrado
Publicado: 31 de agosto de 2023

A miniature IoT-based Ground Station at 433 MHz for reception of telemetry packets from LoRa satellites

Una estación terrena en miniatura basada en IoT a 433 MHz para la recepción de paquetes de telemetría de satélites LoRa

Jorge Simón[1], **José Ricardo Gómez-Rodríguez**[*2], **Marco Cárdenas-Juárez**[3], **Víktor Iván Rodríguez-Abdalá**[2], **Remberto Sandoval-Arechiga**[2], **Salvador Ibarra-Delgado**[2], **José Luis Álvarez-Flores**[4], **J. Villanueva-Maldonado**[2], and **Jorge Flores-Troncoso**[2]

[1] *Investigadoras e Investigadores por México, Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías*
Zacatecas, Mexico,
jsimonro@conahcyt.mx

[2] *Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,*
Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica, Zacatecas , México.
{jrgrodri,abdala,rsandoval,sibarra,juvenal.villanueva,jflorest}@uaz.edu.mx

[3] *Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias*
San Luis Potosí, Mexico,
marco.cardenas@uaslp.mx

[4] *Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*
Colima, Mexico,
alvarez_jose@ucol.mx

Abstract

In this article, a miniature Internet of Things-based ground station operating at 433 MHz for the reception of telemetry packets from LoRa satellites is presented. The ground station is composed of a turnstile antenna, an ESP32-based LoRa reception system, and a rechargeable battery. Connected to Internet via a WLAN router, the ground station offers monitoring capabilities through a web page interface. The website provides a console to track the coordinates of the target satellite, allowing telemetry packets to be downloaded and displayed. The goal of this project is to have a low-cost telemetry ground station for educational and radio amateurs purposes, solving the issue of bringing youth closer to STEM careers, this by means of building a ground station using COTS components that is able to be connected to LEO-orbiting satellites.

Keywords— IoT, Ground Station, LoRa
que

Resumen

En este artículo se presenta una estación terrena en miniatura basada en el Internet de las cosas que funciona a 433 MHz para la recepción de paquetes de telemetría desde satélites LoRa. La estación terrena está compuesta por una antena turnstile, un sistema de recepción LoRa basado en ESP32 y una batería recargable. Conectada a Internet a través de un enrutador WLAN, la estación terrena ofrece capacidades de monitoreo a través de una interfaz web. La página web proporciona una consola para rastrear las coordenadas del satélite objetivo, lo que permite descargar y mostrar paquetes de telemetría. El objetivo de este proyecto es contar con una estación terrena de telemetría de bajo costo para fines educativos y de radioaficionados, solucionando el tema de acercar a los jóvenes a carreras STEM, esto mediante la construcción de una estación terrestre hecha a partir de componentes COTS que es capaz de conectarse con satélites en órbita LEO.

Palabras clave— Internet de las Cosas, Estación Terrena, LoRa

I. Introduction

An increasing number of companies worldwide have been developing networks utilizing LoRa technology for satellite applications. Mainly, the applications that are being developed for these satellites with LoRa technology are designed to serve a variety of purposes, asset tracking, weather monitoring, environmental monitoring, maritime communications, and terrestrial links from space. Interestingly, in different parts of the world, there are ongoing developments utilizing LoRa technology for space applications, particularly for real-time environmental monitoring, as well as vehicle and animal tracking [1]. Table 1 summarizes information on some satellites (different sizes) using LoRa technology and belonging to the Tiny Ground Station (TinyGS) project, providing details about their country of origin and designated applications [2].

Table 1: *Satellites using LoRa Technology*

Name	Country	Organization	Application
Norby [3]	Russia	Moscow University	Geophysical monitoring
FEES [4]	Italy	Italian GPAP	Validating electronics
FossaSat-1 [5]	Spain	FossaSystem	Democratizating space
Satish Dhawan [6]	India	Space Kidz India	Ionising radiation
GaoFen-7 [7]	China	Chang Guang	High resolution imaging

Particularly, ground stations are a core part of accessing and controlling the space segment, facilitating communication with satellites primarily located in low earth orbits (LEO). Commonly, ground stations include modules such as antennas, receivers, transmitters, data processing equipment, and satellite control equipment [8].

In this context, the TinyGS project is an open network of ground stations around the world with the purpose of receiving and communicating with LoRa Satellites, which use inexpensive, versatile, and efficient modules. This project started in 2019 using an ESP-32 to receive LoRa telemetry from the FossaSat-1 satellite [9]. The TinyGS network can share the downloaded information with all users around the world, using web servers, and transceivers. The frequencies at which TinyGS project work are within the UHF band, this is because they imply telemetry links, although there are other applications not considered in the project, for example, data transmission using small satellites, that work at S band frequencies [10] [11].

In this article, the integration of a low-cost miniature Internet of Things (IoT)-based ground station (i.e. a TinyGS) at 433 MHz for reception of telemetry packets from Lora satellites is presented. The ground station is equipped with a turnstile antenna, an ESP32-based LoRa reception system, and a rechargeable battery to fulfill its functions. Linked to the Internet via a WLAN router, this ground station offers comprehensive monitoring capabilities accessible through a user-friendly web page interface. On the web page, users can access a console that allows them to track the precise coordinates of the targeted satellite and download telemetry packages. Furthermore, the platform provides real-time satellite trajectories and displays the retrieved packages, all within the same intuitive interface. The aforementioned ground station is a relatively good alternative for educational or radio amateurs purposes.

The rest of the article is organized as follows: Section II presents a detailed description of the ground station, which includes the antenna system and the LoRa receiver. Then, in Section III, the functionality tests regarding the antenna system and telemetry packet reception are shown. Finally, Section IV presents the conclusions.

II. Ground station

II.1. Antenna system

The antenna system is based on a turnstile antenna or crossed-dipole antenna that works optimally at 433 MHz, which is one of the frequencies of interest for receiving telemetry packets from LoRa small satellites. A turnstile antenna is a radio antenna that consists of pairs of two identical dipole antennas mounted at right angles to each other and fed in phase-quadrature [12]. In this work, a Yagi-type turnstile antenna was built, consisting of 3 pairs of crossed half-wave dipoles: a pair of reflectors (up), a pair of directors (down), and a pair of fed ones (center). Each of the six dipoles measures 34.64 cm in length, with a separation of 17.32 cm between each pair of crossed dipoles.

The antenna is circularly polarized, this is because some satellites do not have attitude control, which means that the satellite is not stable in space and consequently neither is the onboard antenna that transmits to earth [13]. Their lack of attitude control causes losses due to polarization mismatch, an effect that can be minimized by having a circular polarization antenna in the ground station which is achieved using crossed dipoles. Figure 1 shows the antenna, which was designed and built using low-price metallic and plastic materials.

II.2. LoRa receiver system

The receiving system is based on a LILYGO TTGO LoRa32 433 MHz V1.6.1 development board which mainly contains an ESP32 and a LoRa receiver [14]. The receiving system captures telemetry packets from LEO small satellites [15], which, by containing an ESP32, connects to Wi-Fi (WLAN router) and can be monitored from a web page. The information contained in telemetry packets includes transmitted power, the distance at which the

*Correspondence author



Figure 1: *Turnstile antenna used for satellite telemetry reception.*

satellite was listened, elevation angle, RSSI (Received Signal Strength Indicator), SNR (Signal-to-Noise Ratio), among others. Figure 2 shows the LILYGO TTGO LoRa32 433 MHz V1.6.1 development board, whose programming and configuration are available on TinyGS project website [2].



Figure 2: *LILYGO TTGO LoRa32 433 MHz V1.6.1 development board.*

II.3. An IoT ground station

As it was mentioned before, the ground station is monitored via Internet through the TinyGS project website. TinyGS is an open network of Ground Stations worldwide distributed to receive and operate LoRa satellites, weather probes, and other flying objects, using cheap and versatile modules. The website allows monitoring all ground stations registered in TinyGS network. On the website, it is possible to find out the trajectories and positions of small satellites belonging to the network, which at the moment are 17. The project includes 1309 active ground stations and more than 4 million telemetry packages downloaded.

In the case of the ground station for this project which is named "Tuna_Potosina" and as the rest of the ground stations, it can be monitored via website and via a Telegram bot. It is possible to know what satellites are passing near the ground station soon and what the elevation and azimuth angles are to orient the turnstile antenna. Nonetheless, the antenna is directed towards the zenith, so that is why elevation angles near 90° are chosen. On the TinyGS project website, descriptions of the satellites and ground stations belonging to the network can be seen, as well as all the information about the packages downloaded by the ground stations and from which satellites the information was downloaded.

Figure 3 shows a map including ground stations and satellites belonging to the network, stations online are in green, while the ones offline are in red. In addition, satellites are shown in blue with their corresponding real-time location.

III. Functionality tests

In this section the elements functionalities that make up the ground station are described, so below, before describing each of them separately, a block diagram of the architecture of the ground station is shown in Figure 4.

III.1. Antenna tests

Antennas are crucial for ground station satellite reception purposes. In this case, the type of antenna used has a relatively acceptable gain for the application, since common 3-element linearly-polarized Yagi antennas exhibit gains around 6.5 dBi, which leads us to think of a similar gain. The parameter S_{11} (reflection coefficient), shows a value at 433 MHz of -12.9857 dB, implying relatively low losses (5 % of reflection due to impedance mismatch), and making it an antenna that worked acceptably for this kind of terrestrial satellite receptions at UHF frequencies, this characteristic can be noticed in Figure 5 [16].

It is worth mentioning that although the best antenna behavior is shown at 370 MHz, a bandwidth at -10 dB (less than 10 % of reflection due to impedance mismatch) from 410 to 490 MHz is ensured, a range that includes frequencies commonly used for reception from LoRa satellites [17].

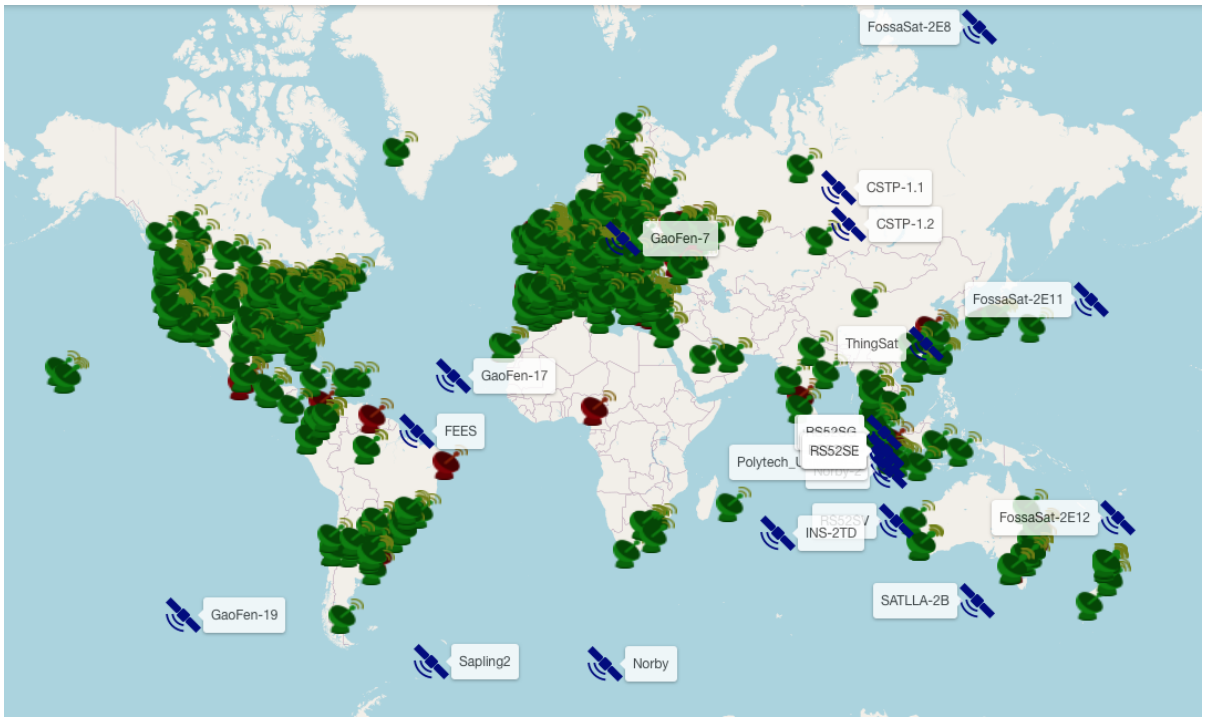


Figure 3: *World map showing the stations and satellites of the TinyGS project.*

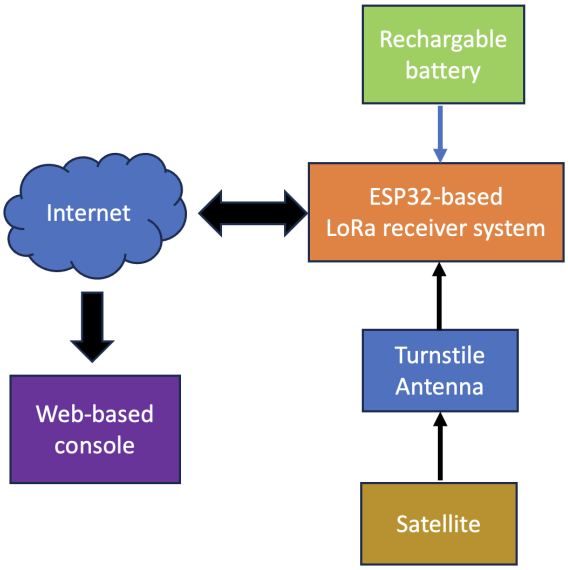


Figure 4: *Architecture of the ground station.*

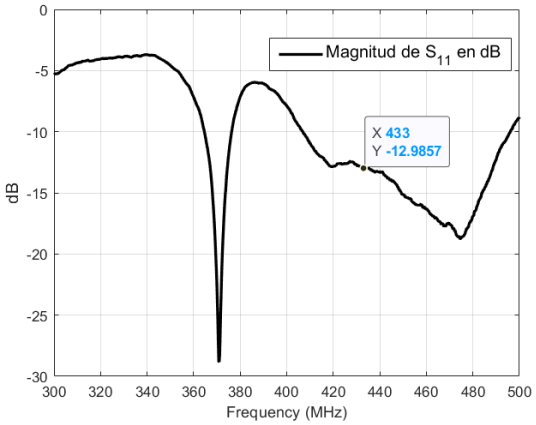


Figure 5: *Parameter S_{11} (reflection coefficient) at 433 MHz.*

III.2. Telemetry packets reception

Once the ground station was fully assembled including its antenna (Figure 6) and also programmed and configured, telemetry packets could be downloaded. Telemetry packets are free to access, and the information they contain is presented and available on the TinyGS website in different formats available to be downloaded, such as hexadecimal and raw parsed views.

Figure 7 shows hexadecimal and condensed raw parsed views of telemetry downloaded from one of the satellites belonging to the network. In addition and regarding each ground station, as it is for "Tuna_Potosina" ground station, a console is available registering the packets downloaded and all the information about it and about the satellite it listened to. Figure 8 shows evidence of reception using the aforementioned ground station.



Figure 6: *The whole ground station: antenna (in green), LoRa receiver system (in gray), and battery (in red).*

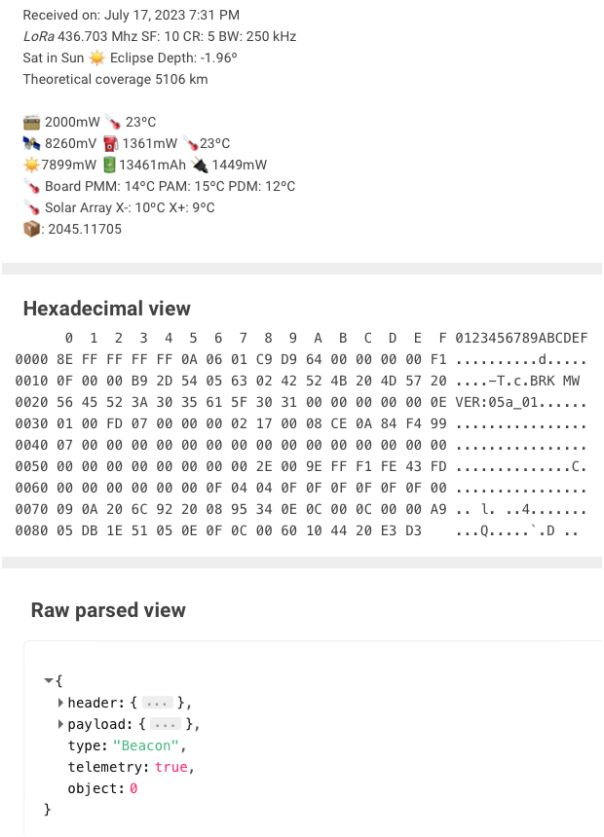


Figure 7: *Hexadecimal and condensed raw parsed views of telemetry downloaded from a satellite.*

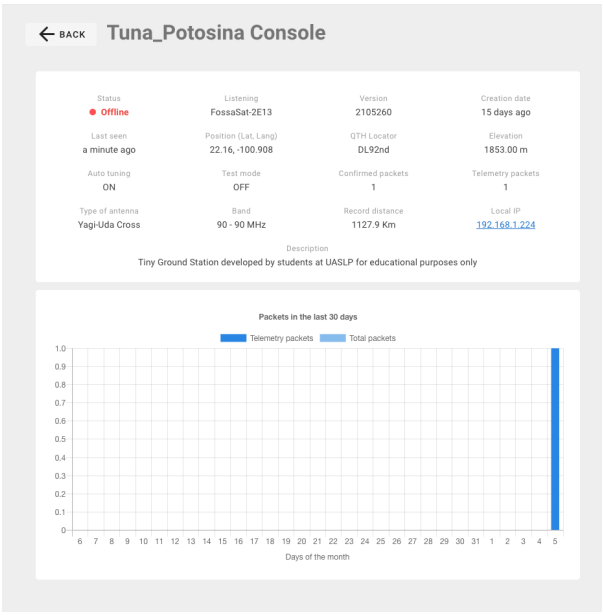


Figure 8: *"Tuna_Potosina" ground station console.*

IV. Conclusions

In this work, a miniature IoT-based ground station, designed to receive telemetry from small satellites as a part of the TinyGS project, was built and presented. The LoRa reception system was assembled using commercial electronics, while the antenna was designed and built using low-cost materials. The antenna receives signals around 433 MHz and with circular polarization to avoid polarization losses.

Telemetry packets reception was successful which allows us to conclude that the aforementioned ground station is a relatively good alternative for educational or radio amateurs purposes. The ground station is connected to Internet and can be monitored and controlled through

a web-based console.

The goal of this project is to have a low-cost telemetry ground station, that solves the issue of bringing youth closer to STEM careers, this by means of building a ground station using COTS components that is able to be connected to LEO-orbiting satellites.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Autonomous University of San Luis Potosí (UASLP), the Regional Space Development Center of the Mexican Space Agency located in Zacatecas City (CREDES-Zacatecas), and the Autonomous University of Zacatecas (UAZ) for providing access to laboratories and radiofrequency measurement infrastructure, through which this project was possible. Also, thanks to the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) for their support through their program "Investigadores e Investigadoras por México" (IxM) and their scholarship program for sabbatical stays.

References

[1] Pooja Lepcha et al. «Application of Small Satellites for Low-Cost Remote Data Collection Using LoRa Transmitters». In: *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN* 19.2 (2021), pp. 224–230.

[2] TinyGS. *TinyGS, the Open Source Global Satellite Network*. 2023. URL: https://tinygs.com.

[3] V Yu Prokopyev et al. «NORBY CubeSat nanosatellite: design challenges and the first flight data». In: *Journal of Physics: Conference Series* Conf. Ser. 1867 012038 (2020), pp. 1–11.

[4] Gunter´s Space Page. *FEES 1,2*. 2023. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/fees-1.htm.

[5] Open Expo Europe. *FOSSASAT-1, LA DEMOCRATIZACIÓN DEL ESPACIO*. 2023. URL: https://openexpoeurope.com/es/session/fossasat-1-la-democratizacion-del-espacio/.

[6] Discover the universe. *Space Kidz India*. 2023. URL: https://spacekidzindia.in.

[7] Gunter´s Space Page. *Gaofen 7, 7-02*. 2023. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/gf-7.htm.

[8] Ubong Ukommi, Emmanuel Ubom, and Ikpaya Ikpaya. «Ground Station Design for Satellite and Space Technology Development». In: *Am. J. Eng. Res* 10 (2022), pp. 12–19.

[9] Fossa Systems. *Estaciones de Tierra*. 2023. URL: https://fossa.systems/es/estaciones-de-tierra/.

[10] Joel A Castillo et al. «Signal Conditioning Stage in S-Band Communication Subsystem for CubeSat Applications». In: *Electronics* 10.14 (2021), p. 1627.

[11] Jose L Alvarez-Flores et al. «Modeling and Fabrication of a Reconfigurable RF Output Stage for Nanosatellite Communication Subsystems». In: *Electronics* 11.1 (2022), p. 149.

[12] Thomas A Milligan. *Modern antenna design*. John Wiley & Sons, 2005.

[13] Rajavardhan Talashila and Harishankar Ramachandran. «Effect of polarization on the link dynamics of a spinning low-earth orbits satellite aligned with geomagnetic field». In: *Engineering Reports* 3.9 (2021), e12402.

[14] Hamparts website. *LILYGO TTGO LoRa32*. 2023. URL: https://hamparts.shop/lilygo-ttgo-lora32-gateway.html.

[15] European Space Agency. *Low Earth Orbit*. 2020. URL: https://www.esa.int.

[16] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.

[17] ECS Inc. International. *LORA AND LORAWAN TIMING*. 2023. URL: https://ecsxtal.com/lora-lorawan-timing.

$\mathcal{DIFU}_{100}ci@$
Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías
Vol. 17, No. 2, Mayo - Agosto 2023
ISSN:2007-3585
Artículo arbitrado
Publicado: 31 de agosto de 2023

Directed Self-assembly of Colloidal Particles on a Blue Phase I Interface

Auto-ensamblaje Dirigido de Partículas Coloidales Sobre una Interfase de Fase Azul I

José A. Martínez-González[*1] and **Stiven Villada-Gil**[2]

[1] *Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.*
Av. Parque Chapultepec 1570, 78210 San Luis Potosí, S.L.P. México.
jose.adrian.martinez@uaslp.mx
[2] *Facultad de Ciencias y Educación, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.*
Carrera 48 Avenida Las Vegas No. 7-151, 4932 Medellín, Colombia.

Abstract

A mean field continuum free energy model of chiral liquid crystals (LCs) is used to consider the self-assembly of colloids and nanoparticles on the surface of a confined Blue Phase I (BPI) with planar anchoring. It is shown that the crystalline defect structure of the blue phase produces intricate, two-dimensional lattices of particles. There are hexagonal and Kagome structures among such arrangements, with lattice parameters that depend on the type of anchoring of the liquid crystal at the colloidal particle's surface. These parameters can be tuned via the chirality of the material, thereby offering intriguing possibilities for the creation of hierarchical materials based on the directed assembly of particles in fluid media.

***Keywords*—** Directed self-assembly, Liquid Crystals, Landau-de Gennes

Resumen

Se emplea un modelo de campo medio de la energía libre de cristales líquidos quirales para estudiar el auto-ensamblaje de coloides y nanopartículas sobre la superficie de un cristal líquido quiral de Fase Azul I confinado con anclaje planar. Se muestra que la estructura cristalina de defectos de la fase azul produce arreglos bidimensionales intrincados de partículas. Hay estructuras hexagonales y tipo Kagome entre tales arreglos, con parámetros de red que dependen del tipo de anclaje de las moléculas del cristal líquido sobre la superficie de las partículas coloidales. Estos parámetros pueden modificarse mediante la quiralidad del material, ofreciendo posibilidades peculiares para el desarrollo de materiales con estructuras jerárquicas basadas en el auto-ensamblaje dirigido de partículas en medios fluidos.

***Palabras clave*—** Auto-ensamblaje dirigido, Cristales Líquidos, Landau-de Gennes

I. Introduction

There is considerable interest in achieving precise control over the position of nanoparticles or colloids for creation of functional materials. In this regard, liquid crystals (LCs) offer unique opportunities. LCs are state of matter that share properties of liquids and crystals. In these phases the molecules can flow while exhibiting order that can be orientational and/or positional. The average molecular orientation of a LC can be described in terms of a vector called nematic director; however, there can be regions where is not possible to define a preferred molecular orientation and those correspond to the so-called topological defects.

Recent experiments and simulations of confined liquid crystals have shown that nanoparticles exhibit a pronounced tendency to segregate to the core of topological defects, thereby minimizing the free energy of the

[*]Autor de correspondencia

composite system [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Such demonstrations suggest that liquid crystals could become a viable platform for hierarchical materials assembly. Liquid crystalline blue phases (BP's) represent a morphology where the local director vector field forms double twist cylinders, organized into cubic periodic structures of disclination lines [11, 12]. The question that we address here is whether blue phases can be used to direct the positioning of nanoparticles, and whether the resulting structures have any features that might be difficult to achieve by other means.

Experimental evidence that nanoparticles enhance the thermal stability of blue phases was obtained by Yoshida et al. [13]. They showed that nanoparticle-stabilized blue phases have a texture similar to that of conventional cubic blue phases. Such an increment of stability could be attributed to the fact that nanoparticles move towards the line defects, where they get trapped. How colloidal nanoparticles can assemble into blue phases in bulk and channels have been studied using a mean field Landau-de Gennes approach. These studies show that nanoparticles might very well either aggregate and form clusters along the disclinations lines [9] or assemble in ordered structures [10, 14]. However, to the best of our knowledge, there are not experimental studies about what structures actually emerge. Another concern that arises from past computational studies of colloidal particles in blue phases is the extent to which particles can in fact be solubilized, in the laboratory, in the corresponding liquid crystal. Additionally, the role of the kind of the nanoparticles anchoring in the nanoparticles self-assembly has not been fully addressed. For instance, past studies focused on nanoparticles with homeotropic anchoring and, by considering the intricate behavior of the director field of blue phases, nanoparticles with planar anchoring may respond in a different way; the stable or metastable positions of hometropic particles may not be the same for the planar ones.

Building on the idea that blue phases can be used to template particle assembly, and based on recent experiments showing that particles segregate to the aqueous-liquid crystal interface, in this work we consider the assembly of nanoparticles at the BPI interface. To this end, we rely on a continuum representation of the material, which in a recent study has been shown to provide quantitative agreement with experiment [15]. In a departure from past work, the BPI is confined into a channel whose thickness is sufficiently large as to avoid breaking of symmetry by confinement. We consider nanoparticles with homeotropic and planar anchoring and, in accordance with experiments [16, 17], the BPI is oriented with the (110) plane parallel to the interface.

II. Methods

The liquid crystals considered here were described in terms of a continuum mean field Landau-de Gennes (LdG) free energy model, which is a fundamental and widely-used theoretical framework in the study of LCs and is particularly powerful in describing their phase transitions and it provides also a quantitative framework for understanding how these materials respond to external perturbations. It considers the LCs system as a continuous and spatially diverse field of order parameters. This order parameter represents the local alignment of the liquid crystal molecules.

In LdG theory the direction of a given molecule and the local average molecular orientation are represented as **a** and **n**, respectively. The scalar order parameter is defined as $S = \left\langle \frac{3}{2}\cos^2\theta - \frac{1}{2} \right\rangle$, with $\cos\theta = \mathbf{a}\cdot\mathbf{n}$; the brackets $<>$ denote a spatial average. The tensor order parameter, $\mathbf{Q}$, is defined by $Q_{ij} = S(n_i n_j - \frac{1}{3}\delta_{ij})$ and is used to express the total free energy F_{total} as

$$F_{\text{total}} = \int_{\text{bulk}} (F_{\text{phase}} + F_{\text{el}})\,\mathrm{d}V + \int_{\text{surf}} F_{\text{ChannSurf}}\,\mathrm{d}S + \int_{\text{NpSurf}} F_{\text{surf}}\,\mathrm{d}S. \tag{1}$$

F_{phase} accounts for the short-range interactions, it is given by

$$F_{\text{phase}} = \frac{A}{2}\left(1 - \frac{U}{3}\right) Q_{ij}Q_{ji} + \frac{AU}{3}Q_{ij}Q_{jk}Q_{ki} + \frac{AU}{4}(Q_{ij}Q_{ji})^2, \tag{2}$$

where A is a constant and U is a dimensionless parameter related to the reduced temperature by $\tau = 9(3-U)/U$. In Equation (1), F_{el} represents the long-range elastic free energy,

$$F_{\text{el}} = \frac{L}{2}\frac{\partial Q_{ij}}{\partial x_k}\frac{\partial Q_{ij}}{\partial x_k} + 2q_0 L\epsilon_{ikl}Q_{ij}\frac{\partial Q_{lj}}{\partial x_k}, \tag{3}$$

where L is the elastic constant, and $q_0 = \frac{2\pi}{p_0}$ is the inverse of the pitch that measures the chirality of the system (and vanishes for non-chiral systems). Here ϵ_{ikl} is the Levi-Civita tensor. The channel surface free energy $F_{\text{ChannSurf}}$ is given by a Fournier-Galatola [18] expression of the form

$$F_{\text{ChannSurf}} = W\left(\tilde{Q}_{ij} - \tilde{Q}^{\perp}_{ij}\right)^2 \tag{4}$$

where W is the degenerate planar anchoring strength. The Q tensor satisfies $\tilde{Q}_{ij} = Q_{ij} + \frac{1}{3}S_{eq}\delta_{ij}$, with $S_{eq} =$

$\frac{1}{4}\left(1+3\sqrt{1-\frac{8}{3U}}\right)$. Note that $\tilde{Q}_{ij}^{\perp}$ denotes the projection of $\tilde{Q}_{ij}$ on the surface, defined with surface normal ν_i as $\tilde{Q}_{ij}^{\perp} = P_{ik}\tilde{Q}_{kl}P_{lj}$, where $P_{ij} = \delta_{ij} - \nu_i\nu_j$ is the projection operator. A similar expression, gives the surface free energy for PNp's, while for HNp, it takes the form:

$$F_{\mathrm{NpSurf}} = \frac{1}{2}W_{Np}\left(Q_{ij} - Q_{ij}^{0}\right)^2 \tag{5}$$

where W_{Np} is the nanoparticle anchoring strength and Q_{ij}^{0} is the surface-preferred tensorial order parameter [19].

The following values, which are well in the range expected for common chiral liquid crystals, were used for all calculations: $L = 2.5 \times 10^{-11}$ N, $A = 1.02 \times 10^{5}$ J/m^3 [11, 19, 20]. A lattice array with mesh size of 10 nm was used to perform all simulations. The minimization of the free energy was achieved by means of the Euler-Lagrange equation with appropriate boundary conditions [19, 20, 21, 22, 23].

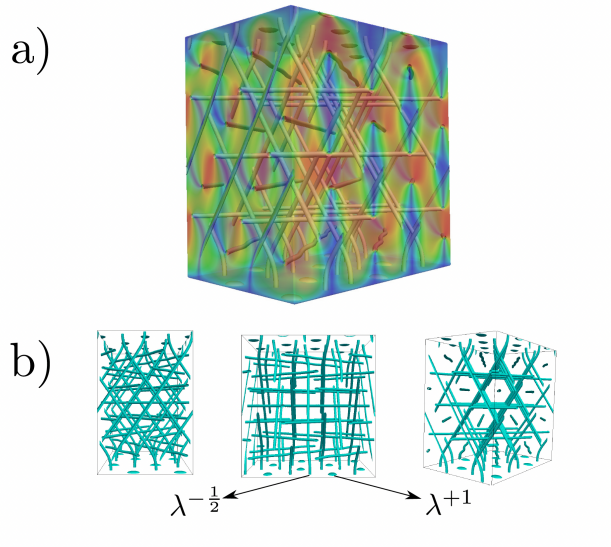


Figure 1: *a) A confined BPI into a channel with planar anchoring. The color represents the orientation of the local director. The figure was made slightly transparent to allow the disclination lines to be seen. b) Different lateral views of the disclination lines show how the line defects bend at the proximity of the interface.*

III. Results and Discussion

III.1. Structure of the BPI within a planar channel

We present results of simulations for a BPI with chiral pitch, $p = 700$ nm confined into a channel of thickness, $H = 2.1\mu$m. The anchoring at the walls is planar degenerate anchoring with energy $W = 1.2 \times 10^{-3}$ J/m^2 . Figure 1a shows a representative structure of the confined BPI. In this and subsequent figures, the color indicates the orientation of the local director: it is blue when the molecules are parallel to planar surfaces ($x - y$ plane), and red when they are perpendicular to such surfaces (or parallel to the z axis). We find that strong planar anchoring at each interface distorts the disclination lines mainly along the first 300 nm, and a well-formed BPI is obtained in the central region of the system (see Fig. 1b). Having shown that the BPI can be confined under these conditions, we can now proceed to examine the interfaces of the system which, by symmetry, have the same properties, thereby allowing us to focus on one of them. Figure 2 shows the upper section of the system, where one can clearly see the director field at the interface. Although somehow distorted, the $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ disclination lines reach the interface. As a consequence, the director field on the surfaces has a pattern of $\lambda^{-\frac{1}{2}}$, as well as λ^{+1} defects with the symmetry of the (110) plane of the BPI in bulk (Fig. 2), and a global topological charge of zero. Moreover, the λ^{+1} defects form an hexagonal array with lattice parameters $a_1 = p$ and $a_2 = \sqrt{3}p/2$.

The BPI is oriented with the (110) plane parallel to the interface, and this makes a remarkable difference with respect to previous studies of BPI confined into channels [24, 25]. If such an orientation is not taken into account,

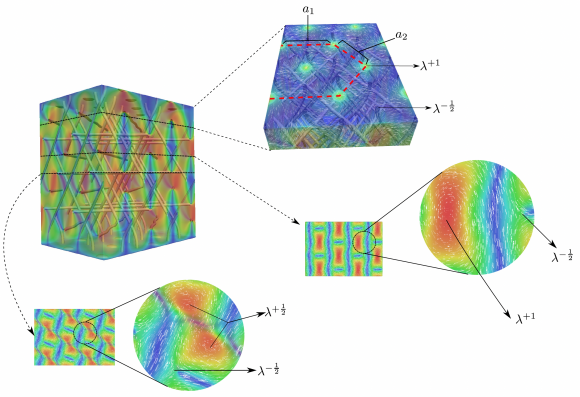


Figure 2: *Upper and transversal sections of the confined BPI. The hexagonal array of the λ^{+1} defects at the interface has lattice parameter $a_1 = p$ and $a_2 = \sqrt{3}p/2$. All the transversal sections have zero topological charge.*

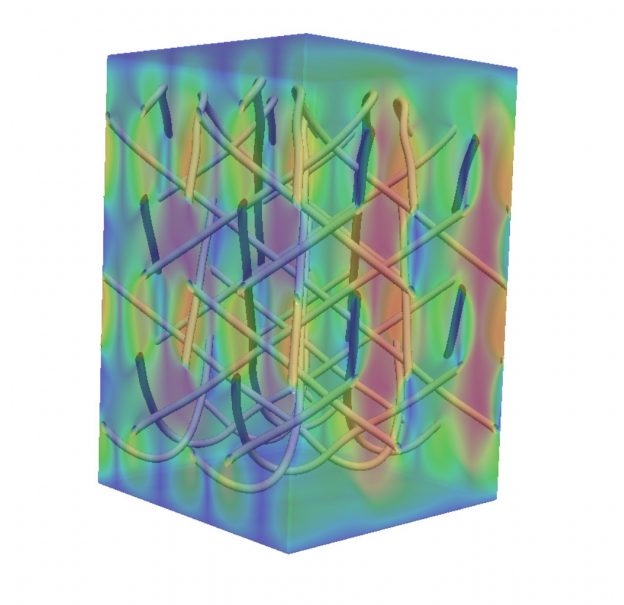


Figure 3: *Disclination lines in a BPI with the (100) plane parallel to the interface. This structure has higher free energy than the case with the (110) plane parallel to the channel's surface.*

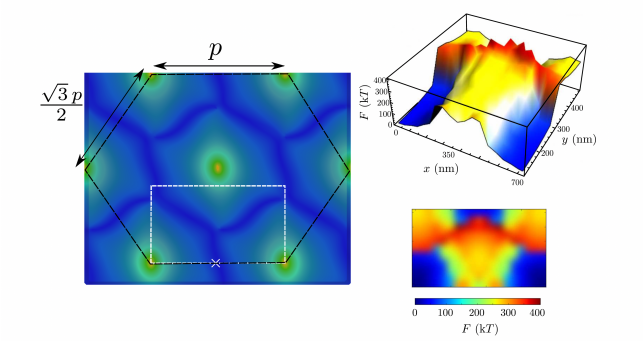


Figure 4: *(Left) Section of the top surface of the system. A HNp was deposited on different positions of the selected region to obtain the spatial dependence of the free energy (right). The free energy when the HNp is located on the λ^{+1} site was taken as reference. The corresponding metastable position is marked by the X in the left figure.*

the planar anchoring at the interface intensifies the strain on the BPI-unit cells and increases the free energy. As a consequence, in the case of a BPI with the (100) planes parallel to the interface [24, 25], the disclination lines do not reach the interface (Fig.3).

III.2. Nanoparticles deposition

For nanoparticle assembly, we consider particles with radius, $R = 120$ nm with planar and homeotropic anchoring with $W_{\rm P} = W_{\rm H} = 2.5 \times 10^{-4}$ J/m^2. First, we determine the positions on the surface which are most energetically favorable for deposition of nanoparticles having planar and homeotropic anchoring, respectively. Next, we proceed to analyze 50-50% mixtures of homeotropic (HNp) and planar (PNp) nanoparticles and, lastly, we consider the particular case of a mixture of 75% HNp and 25% PNp.

Figure 4 shows a free energy map for a HNp. We can appreciate from the figure that the sites with lower free energy correspond to the positions of the λ^{+1} point defects, which were taken as reference. Interestingly, there are also metastable states which do not correspond to the positions of $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ defects but a location between them. Such regions also adopt a hexagonal arrangement, with the same lattice parameters than those obtained for the λ^{+1} defects. This implies that only half of the sites between the $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ defects are metastable. A closer look at a HNp on a metastable site shows that the disclination lines approach the bottom of the particle. This changes the symmetry of the system at the interface (Fig. 5). Based on these observations, we predict that HNp's deposited on a BPI interface with planar anchoring will primarily assemble following the λ^{+1}-hexagonal array with lattice parameters $a_1 = p$ and $a_2 = \sqrt{3}p/2$, but that metastable positions will also be filled without giving rise to "crystallographic defects".

Parallel particles (PNp's) only exhibit free energy minima at the λ^{+1} positions. For this case, the sites between $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ defects correspond to saddle points in the free energy landscape (Fig. 6). This finding suggests a possible pathway to study particle assembly in HNp-PNp mixtures or, more precisely, the deposition of PNp's followed by HNp's. To do so, we first simulate a 50-50 mixture of HNp and PNp. First, eight PNp's are positioned on the λ^{+1} sites, followed by eight HNp's placed in what were their metastable positions (Fig. 7a). For such a nanoparticle distribution, there is enough room to place additional nanoparticles that could give rise to more compact structures. In the HNp-free energy surface (Fig. 4), it is possible to identify regions that, once the preferred sites are occupied, could be populated without a large energetic cost. By taking into account the nanoparticle's size, such regions correspond to the available sites between $\lambda^{-\frac{1}{2}}$ defects. The resulting compact structure represents a Kagome-like array (Fig. 7b). We estimate that the free energy difference between the hexagonal and Kagome structures is 296 k_BT, with the hexagonal array being more stable. The Kagome lattice, however, can become more favorable at higher concentrations. We also studied a system comprising eight PNp's and twenty-four HNp's, which results in an hexagonal array of PNp's and a Kagome structure for HNp's (Fig. 8).

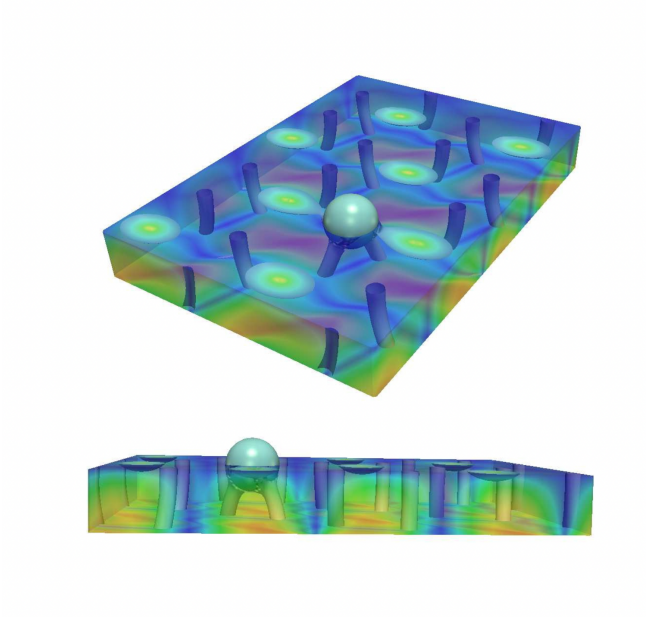


Figure 5: *Top and lateral view of the disclination lines when a HNp is placed at a metastable site. Such a site is located between two $\lambda^{-\frac{1}{2}}$, the disclination lines now bend toward the particle bottom as they approach at the interface.*

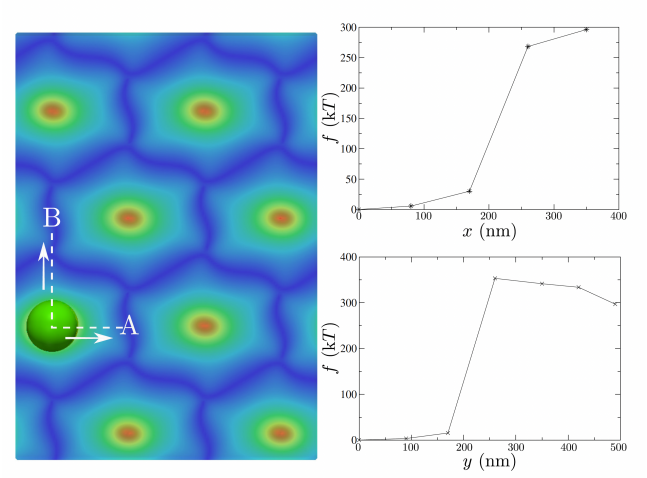


Figure 6: *Free energy as a function of the distance for a PNp that is moving from its minimum energy position, which is taken as a reference, in the x and y directions respectively. Note that A and B positions are equivalent.*

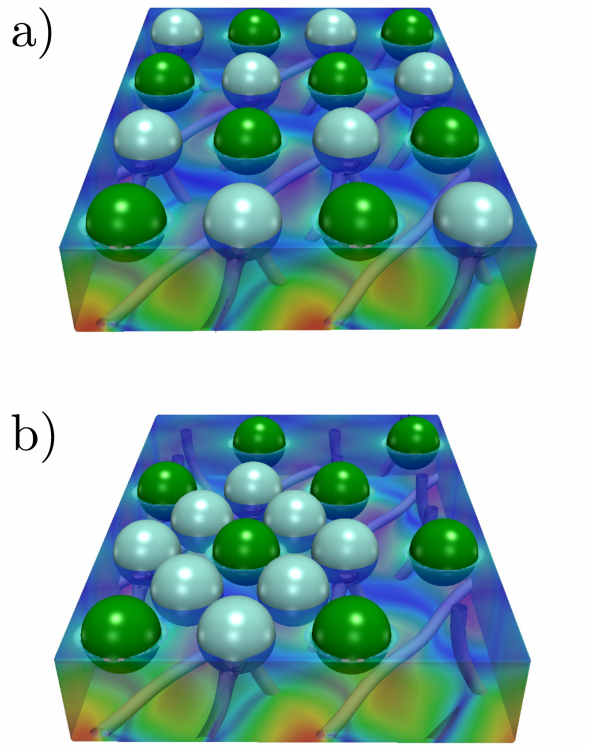


Figure 7: *a) A 50-50 mixture of PNp's (green) and HNp's (blue). The PNp's are placed on the λ^{+1} defects while the HNp's fill out what were their metastable positions. Both kind of nanoparticles form an hexagonal array of the same size. b) The same number of nanoparticles but in a more compact Kagome-like structure.*

Experimentally, these colloidal crystalline structures formed by particles with different anchoring can be obtained by taking advantage of either nano-particle sputter-doping method [13] or a combination of forming particles in-situ [26] and nano-particle sputter-doping technique. Following Yoshida et al., one could use sputter-doping to fabricate a highly dispersed nanoparticle-liquid crystal suspension with target particles [13]. Alternatively, the second colloidal particles could be generated through the phase separation of chiral liquid crystal from the second component in a binary mixture by quenching the blue phase. Since all the lattice parameters of the structures so far depend on the pitch, the BPI-channel offers a possibility of having a crystalline colloidal assembly that can be tuned via chirality and particle concentration.

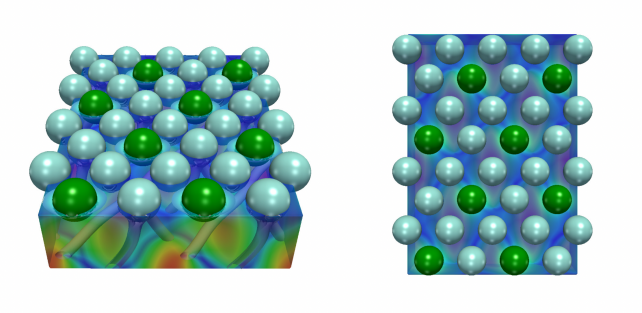


Figure 8: *A 25-75% mixture of PNp and HNp respectively, where the PNp's form an hexagonal array while the HNp's assemble in a Kagome structure.*

IV. Conclusions

At the BPI-planar interface, colloids prefer to localize in the regions with the highest free energy, which correspond to the cores of $\lambda^{-1/2}$-topological defects followed by the λ^{+1} defects. Therefore, a hexagonal array of colloidal particles can be produced, with a lattice parameter that depends on the chiral pitch (Fig. 4). Interestingly, for planar nanoparticles, only the regions with $\lambda^{-1/2}$-topological defects are the preferred while homeotropic nanoparticles can also localized at regions with λ^{+1} defects. This fact enables the possibility of directing the self-assembly of colloids to form different crystalline arrangements. Particularly, a gradual deposition of colloids according to their surface anchoring can induce the formation of hexagonal and kagome lattices. This study shows how ordered structures of particles can be achieved on a fluid media, where the morphology of the lattices can be tuned via chirality and be destroyed and reproduced in terms of the phase behavior of the liquid crystal.

Acknowledgments

We acknowledge support from Ciencia de Frontera CONACYT grant CF-2019-74885.

References

[1] Marcello Cavallaro Jr et al. «Exploiting imperfections in the bulk to direct assembly of surface colloids». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110.47 (2013), pp. 18804–18808.

[2] Mohammad Rahimi et al. «Nanoparticle self-assembly at the interface of liquid crystal droplets». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.17 (2015), pp. 5297–5302.

[3] Miha Škarabot et al. «Hierarchical self-assembly of nematic colloidal superstructures». In: *Physical Review E* 77.6 (2008), p. 061706.

[4] David Pires, Jean-Baptiste Fleury, and Yves Galerne. «Colloid particles in the interaction field of a disclination line in a nematic phase». In: *Physical Review Letters* 98.24 (2007), p. 247801.

[5] Jonathan K Whitmer et al. «Nematic-field-driven positioning of particles in liquid crystal droplets». In: *Physical review letters* 111.22 (2013), p. 227801.

[6] Jun-ichi Fukuda et al. «Stability of cholesteric blue phases in the presence of a guest component». In: *Physical Review E* 86.4 (2012), p. 041704.

[7] Brigita Rožič et al. «Theoretical and experimental study of the nanoparticle-driven blue phase stabilisation». In: *The European Physical Journal E* 34.2 (2011), p. 17.

[8] Emine Kemiklioglu, Jeoung-Yeon Hwang, and Liang-Chy Chien. «Stabilization of cholesteric blue phases using polymerized nanoparticles». In: *Physical Review E* 89.4 (2014), p. 042502.

[9] Kevin Stratford et al. «Self-assembly of colloid-cholesteric composites provides a possible route to switchable optical materials». In: *Nature communications* 5.1 (2014), p. 3954.

[10] Miha Ravnik et al. «Three-dimensional colloidal crystals in liquid crystalline blue phases». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108.13 (2011), pp. 5188–5192.

[11] David C Wright and N David Mermin. «Crystalline liquids: the blue phases». In: *Reviews of Modern physics* 61.2 (1989), p. 385.

[12] PP Crooker. «The cholesteric blue phase: A progress report». In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 98.1 (1983), pp. 31–45.

[13] Hiroyuki Yoshida et al. «Nanoparticle-stabilized cholesteric blue phases». In: *Applied physics express* 2.12 (2009), p. 121501.

[14] Miha Ravnik et al. «Confining blue phase colloids to thin layers». In: *Soft Matter* 7.21 (2011), pp. 10144–10150.

[15] José A Martínez-González et al. «Blue-phase liquid crystal droplets». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112.43 (2015), pp. 13195–13200.

[16] Jin Yan et al. «Angular dependent reflections of a monodomain blue phase liquid crystal». In: *Journal of Applied Physics* 114.11 (2013).

[17] Tsung-Hsien Lin et al. «Red, green and blue reflections enabled in an optically tunable self-organized 3D cubic nanostructured thin film». In: *Advanced Materials* 25.36 (2013), pp. 5050–5054.

[18] J-B Fournier and Paolo Galatola. «Modeling planar degenerate wetting and anchoring in nematic liquid crystals». In: *Europhysics Letters* 72.3 (2005), p. 403.

[19] Miha Ravnik et al. «Mesoscopic modelling of colloids in chiral nematics». In: *Faraday discussions* 144 (2010), pp. 159–169.

[20] A Dupuis, D Marenduzzo, and JM Yeomans. «Numerical calculations of the phase diagram of cubic blue phases in cholesteric liquid crystals». In: *Physical Review E* 71.1 (2005), p. 011703.

[21] GP Alexander and JM Yeomans. «Numerical results for the blue phases». In: *Liquid Crystals* 36.10-11 (2009), pp. 1215–1227.

[22] Miha Ravnik and Slobodan Žumer. «Landau–de Gennes modelling of nematic liquid crystal colloids». In: *Liquid Crystals* 36.10-11 (2009), pp. 1201–1214.

[23] V Tomar et al. «Morphological transitions in liquid crystal nanodroplets». In: *Soft Matter* 8.33 (2012), pp. 8679–8689.

[24] Jun-ichi Fukuda, Slobodan Žumer, et al. «Novel defect structures in a strongly confined liquid-crystalline blue phase». In: *Physical review letters* 104.1 (2010), p. 017801.

[25] Jun-ichi Fukuda, Slobodan Žumer, et al. «Field-induced dynamics and structures in a cholesteric-blue-phase cell». In: *Physical Review E* 87.4 (2013), p. 042506.

[26] Jean-Christophe Loudet, Philippe Barois, and Philippe Poulin. «Colloidal ordering from phase separation in a liquid-crystalline continuous phase». In: *Nature* 407.6804 (2000), pp. 611–613.

$\mathcal{DIFU}_{100}ci@$
Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías
Vol. 17, No. 2, Mayo - Agosto 2023
ISSN:2007-3585
Artículo arbitrado
Publicado: 31 de agosto de 2023

Interpolation strategies for motion planning on a 2-DOF SCARA robot

Estrategias de interpolación para la planificación de trayectorias en un robot SCARA de 2 GDL

Fermín Marcelo R. Maciel Barboza[*1], **Antonio Concha Sánchez**[1], **Leonel Soriano Equigua**[1], **Luis Alberto Contreras Aguilar**[1], **José Luis Álvarez Flores**[1], and **Víctor H. Castillo Topete**[1]

[1] *Universidad de Colima,*
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Carretera Colima - Coquimatlan km 9, Valle de las Huertas, 28400 Coquimatlán, Col.
{fermin_maciel, aconcha, lsoriano, luisc, alvarez_jose, victorc}@ucol.mx

Abstract

This article presents a systematic methodology for trajectory planning in 2-degree-of-freedom SCARA robots using linear and circular interpolation. The robot's kinematics are addressed, describing both direct and inverse equations, and algorithms for generating smooth trajectories are detailed. The G-code is explored as a tool for motion control, and Matlab software is utilized for simulations. The versatility of these concepts is emphasized, showcasing how the methodology can be applied to various types of robots. Linear and circular interpolation algorithms, along with the integration of G-code for motion control, offer a didactic approach providing a practical experience to comprehend the fundamental principles of trajectory planning.

***Keywords*—** Robot Path, Interpolation, Gcode

Resumen

Este artículo presenta una metodología sistemática para la planificación de trayectorias en robots SCARA de 2 grados de libertad mediante interpolación lineal y circular. Se aborda la cinemática del robot, describiendo las ecuaciones directas e inversas, y se detallan algoritmos para generar trayectorias suaves. Se explora el código G como herramienta de control de movimiento y se utiliza el software Matlab para simulaciones. La versatilidad de estos conceptos se destaca, mostrando cómo la metodología puede aplicarse a diversos tipos de robots. Los algoritmos de interpolación lineal y circular, junto con la integración del código G para el control de movimiento, ofrecen un enfoque didáctico que proporciona una experiencia práctica para comprender los principios fundamentales de la planificación de trayectorias.

***Palabras clave*—** Trayectoria del robot, Interpolación, Código G

I. Introducción

Los robots de brazo articulado de cumplimiento selectivo (SCARA) son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, especialmente en tareas de ensamblaje y manipulación, debido a su rapidez, precisión y simplicidad mecánica [1]. Estos robots presentan ventajas considerables en entornos donde se requiere un desplazamiento plano eficiente y controlado.

En el contexto educativo, los robots SCARA también ofrecen un escenario ideal para introducir conceptos clave de cinemática, interpolación y planificación de trayectorias, ya que su estructura plana simplifica el análisis sin sacrificar la complejidad de los problemas de control. Este trabajo se centra en la planificación de trayectorias utilizando algoritmos de interpolación lineal y circular, considerando su aplicación en un robot SCARA de dos grados de libertad (DoF).

[*]Autor de correspondencia

El objetivo principal es proporcionar una metodología clara, sistemática y didáctica para generar trayectorias suaves que puedan ser seguidas por un brazo robótico, integrando tanto la cinemática directa e inversa como la codificación en lenguaje G (G-code), comúnmente utilizado en sistemas CNC. Además, se incorpora el uso del software *NC Corrector*, un visualizador gratuito de trayectorias, para validar los resultados obtenidos. Esta combinación de elementos busca facilitar la comprensión práctica de los principios fundamentales del movimiento robótico, haciendo de esta propuesta una herramienta útil tanto en entornos académicos como en aplicaciones de prototipado y validación de trayectorias.

II. Estado del arte

Diversos estudios han abordado la planificación de trayectorias en robots manipuladores, con especial atención a la interpolación y control de movimiento. En [2], se presenta un modelo cinemático y dinámico, junto con una descripción del perfil de aceleración para un manipulador industrial de 2 DoF. Por su parte, [1] propone un controlador de bajo costo y alta calidad para un robot SCARA, derivando las ecuaciones cinemáticas y utilizando interpolación circular mediante el método del analizador diferencial digital vectorial.

En [3], se implementa un brazo manipulador capaz de ejecutar rutas específicas bajo restricciones definidas por el diseño del robot. En cuanto a la generación de leyes de movimiento para actuadores, [4] desarrolla un programa basado en las características geométricas del robot. Asimismo, [5] emplea interpolación conjunta, lineal y circular en un entorno CompactRIO para controlar un robot manipulador de cinco grados de libertad.

En el ámbito del suavizado de trayectorias, [6] propone un método que garantiza continuidad G2, precisión geométrica y rendimiento en tiempo real. Finalmente, [7] realiza una revisión detallada sobre métodos actuales de planificación de trayectorias, enfocándose en la evasión de obstáculos y en la implementación práctica de estas técnicas en entornos tridimensionales.

A diferencia de los trabajos revisados, que se centran principalmente en la optimización de trayectorias o en la implementación de controladores industriales, la presente propuesta enfatiza el aspecto didáctico y formativo de la planeación de trayectorias en robots SCARA. Además, integra de manera novedosa el uso combinado del código G y el entorno Matlab como herramientas accesibles para la simulación, visualización y validación del movimiento, lo que permite una comprensión más intuitiva de los principios cinemáticos y de interpolación. Esta integración práctica, orientada a la enseñanza y prototipado, contrasta con los enfoques más técnicos o puramente teóricos de los estudios previos, reforzando el valor educativo de la metodología desarrollada.

III. Modelado del sistema

Los robots son en sí mismos sistemas mecánicos, sin embargo, se han desarrollado métodos para representar los aspectos geométricos básicos de la manipulación robótica, así como los aspectos dinámicos de la manipulación. Mediante estos modelos matemáticos, es posible desarrollar métodos para planificar y controlar los movimientos de los robots para realizar tareas específicas.

De acuerdo con [8], los manipuladores robóticos están compuestos por eslabones conectados por articulaciones para formar una cadena cinemática. Las articulaciones suelen ser rotativas (revolutas) o lineales (prismáticas). Una articulación giratoria es como una bisagra y permite la rotación relativa entre dos eslabones. Una junta prismática permite un movimiento relativo lineal entre dos enlaces.

De acuerdo con [9] la cinemática es la parte de la dinámica que describe el movimiento de los cuerpos sin referencia a las fuerzas que lo causan ni a las que se generan a consecuencia de este. La cinemática de un robot corresponde al estudio de los movimientos de un robot, es decir mediante un análisis cinemático ya sea la posición, velocidad y aceleración de cada uno de los elementos del robot son calculados sin considerar las fuerzas que causan el movimiento [10].

Los autores en [11] describen métodos para obtener la cinemática directa e inversa en robot de 1 DoF; del robot planar, antropomórfico y cilíndrico de 3 DoF y 5 DoF, entre otros. La cinemática directa utiliza los parámetros comunes para calcular la configuración de la posición, y la cinemática inversa como bien dice su nombre invierte este cálculo para determinar los parámetros de conjuntos que logra una configuración deseada.

Por su parte, la investigadora Elena García Armada [12] en su trabajo "Los robots y sus capacidades"define el número de grados de movilidad (gdm) de un robot como el número de articulaciones que lo constituyen, por su parte los grados de libertad (DoF, por sus siglas en inglés) se definen como el número de movimientos independientes que puede realizar el extremo efectivo del robot en el espacio tridimensional.

En esta sección se describe el modelo cinemático del sistema utilizado. En la Figura 1 se presenta el diagrama esquemático del robot el cual corresponde a un sistema que tiene 2 grados de libertad (DoF, por sus siglas en inglés) en un plano horizontal.

Las coordenadas conjuntas utilizadas para el análisis cinemático del sistema son los ángulos θ_1 y θ_2, que representan la rotación absoluta del primer eslabón y la rotación relativa del segundo eslabón respecto al primero, respectivamente. Los parámetros del sistema se describen

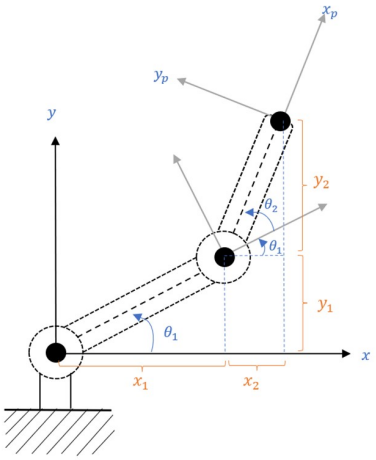


Figura 1: *Estructura esquemática del robot de 2 DoF.*

en la Tabla 1.

Tabla 1: *Parámetros del robot de 2 DoF.*

Parámetro	Descripción
l_1	Longitud del primer eslabón en cm
l_2	Longitud del segundo eslabón en cm
θ_1	Ángulo de movimiento del primer eslabón respecto al eje x, y
θ_2	Ángulo de movimiento del segundo eslabón respecto al eje x_1, y_1
(x_p, y_p)	Coordenadas del efector final

III.1. Cinemática directa

La cinemática directa de un manipulador puede obtenerse a través de diferentes métodos matemáticos, entre los cuales se encuentran los enfoques geométrico, matricial y algebraico. En este caso, el procedimiento utilizado se basa en las relaciones trigonométricas entre las longitudes de los eslabones y los ángulos articulares, por lo que puede considerarse un enfoque geométrico con formulación algebraica, ya que parte del análisis geométrico del manipulador y expresa las relaciones de posición mediante ecuaciones trigonométricas.

Considérese la posición de la base (articulación 1) en $x_0 = 0$ y $y_0 = 0$, con longitudes de los eslabones l_1 y l_2, como se muestra en la Figura 1, donde se presentan los parámetros necesarios para el cálculo de la cinemática directa. En dicha figura, la posición de la articulación 2 se representa mediante las coordenadas (x_1, y_1), las cuales se obtienen directamente a partir de las funciones trigonométricas del ángulo de la primera articulación θ_1:

$$\cos(\theta_1) = \frac{x_1}{l_1} \tag{1}$$

$$\sin(\theta_1) = \frac{y_1}{l_1} \tag{2}$$

A partir de las ecuaciones (1) y (2) se pueden obtener las coordenadas x_1 como y_1 como se muestra a continuación:

$$x_1 = l_1 \cos(\theta_1) \tag{3}$$

$$y_1 = l_1 \sin(\theta_1) \tag{4}$$

Los valores de x_2 así y_2 se encuentran del mismo modo teniendo en cuenta que el ángulo del segundo eslabón está dado por $\theta_1 + \theta_2$ como se muestra en la Figura 1, por lo tanto, las coordenadas x_2 como y_2 están dadas por:

$$x_2 = l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{5}$$

$$y_2 = l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{6}$$

La posición final del robot dados por las coordenadas x_p así como y_p las cuales se definen como:

$$x_p = x_1 + x_2 = l_1 \cos\theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \tag{7}$$

$$y_p = y_1 + y_2 = l_1 \sin\theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \tag{8}$$

Mediante la cinemática directa se puede encontrar entonces la posición del efector final definiendo valores de entrada de longitud de los eslabones (l_1 y l_2), las coordenadas de la posición inicial del brazo (x_0, y_0) y los ángulos de las articulaciones (θ_1 y θ_2). En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo para el cálculo de la cinemática directa.

En la Figura 3 se muestra el resultado de la simulación de la cinemática directa realizada en Matlab, considerando los siguientes parámetros: $l_1 = 15$, $l_2 = 15$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $\theta_1 = 70°$ y $\theta_2 = 60°$. En la Figura 3, los eslabones del robot se representan mediante líneas, mientras que las articulaciones se indican con círculos. Los cálculos arrojan un resultado para la posición del efector final de $x_p = -4.512$ y $y_p = 25.59$, valores que pueden corroborarse fácilmente mediante la inspección visual de la gráfica.

En la Figura 4 se presenta el resultado de la simulación de la cinemática directa considerando los parámetros $l_1 = 15$, $l_2 = 15$, $x_0 = 0$ y $y_0 = 0$. Para este análisis, se emplea un vector de ángulos con incrementos de $5°$ en ambos ejes articulares: $\theta_1 = 0°, 5°, 10°, \ldots, 180°$ y $\theta_2 = -180°, -175°, \ldots, 0°, 5°, \ldots, 180°$. El propósito de esta simulación es determinar el área de trabajo del robot. En lugar de representar posiciones específicas del brazo, se muestra la trayectoria resultante del movimiento del efector final.

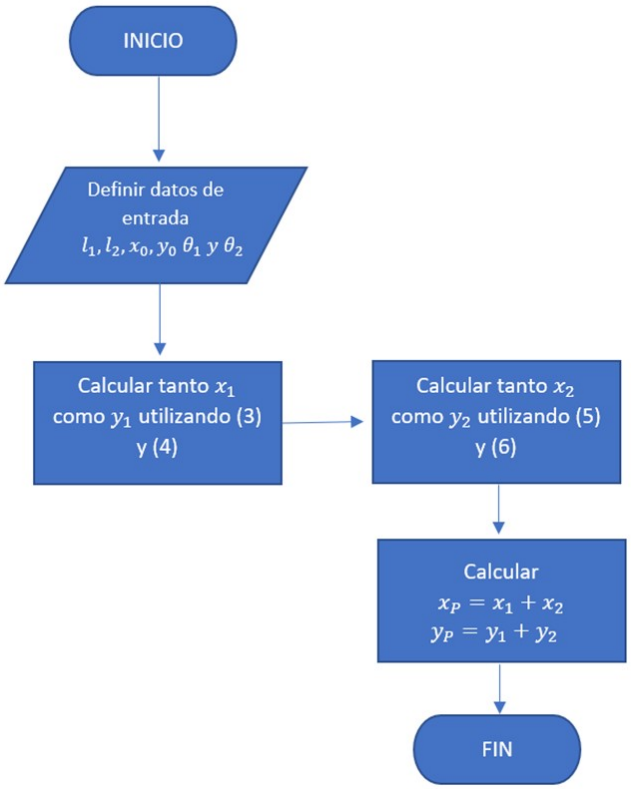


Figura 2: *Diagrama de flujo para el cálculo de la cinemática directa.*

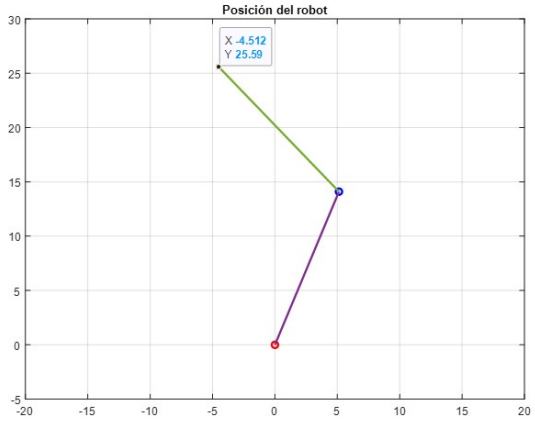


Figura 3: *Resultado de la simulación de la cinemática directa en Matlab.*

III.2. Cinemática inversa

Para la cinemática inversa, se obtienen las ecuaciones de la posición del efector final para obtener los ángulos de las articulaciones. Es decir, teniendo la posición del efector final (x_p, y_p), se requiere obtener el valor de los ángulos θ_1 y θ_2 como se muestra en la Figura 1.

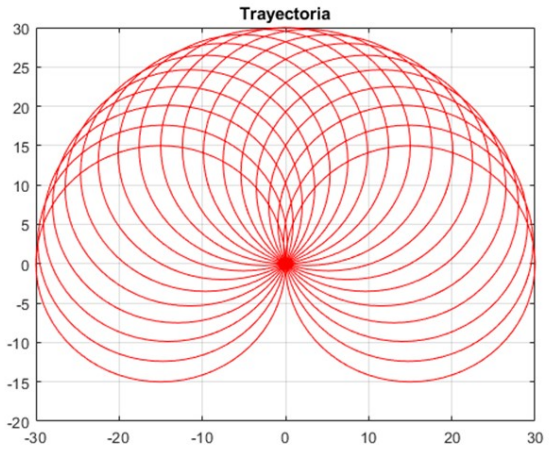


Figura 4: *Simulación de trayectoria del robot mediante cinemática directa.*

Dadas las ecuaciones (7) y (8), se calcula $r^2 = x_p^2 + y_p^2$, siendo r la distancia del origen al efector final teniendo en cuenta que $x_p = x_1 + x_2$ así como $y_p = y_1 + y_2$:

$$x_p^2 + y_p^2 = (l_1C_1 + l_2C_{12})^2 + (l_1S_1 + l_2S_{12})^2 \qquad (9)$$

donde por simplicidad se escribe $C_1 = \cos(\theta_1)$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$,$S_1 = \sin(\theta_1)$ y $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$. Se calcula x_p^2 a partir la ecuación (9) y se tiene:

$$\begin{aligned} x_p^2 &= (l_1C_1 + l_2C_{12})^2 \\ x_p^2 &= (l_1C_1)^2 + 2(l_1C_1)(l_2C_{12}) + (l_2C_{12})^2 \\ x_p^2 &= l_1^2C_1^2 + 2l_1l_2C_1C_{12} + l_2^2C_{12}^2 \end{aligned} \qquad (10)$$

También se calcula p_y^2 a partir de la ecuación (9) y se tiene que

$$\begin{aligned} y_p^2 &= (l_1S_1 + l_2S_{12})^2 \\ y_p^2 &= (l_1S_1)^2 + 2(l_1S_1)(l_2S_{12}) + (l_2S_{12})^2 \\ y_p^2 &= l_1^2S_1^2 + 2l_1l_2S_1S_{12} + l_2^2S_{12}^2 \end{aligned} \qquad (11)$$

Sustituyendo (10) y (11) en la ecuación (9) se tiene:

$$\begin{aligned} x_p^2 + y_p^2 = (l_1^2C_1^2 + 2l_1l_2C_1C_{12} + l_2^2C_{12}^2) + \ldots \\ +(l_1^2S_1^2 + 2l_1l_2S_1S_{12} + l_2^2S_{12}^2) \end{aligned} \qquad (12)$$

Se simplifica el resultado de la ecuación (12) de y se obtiene:

$$\begin{aligned} x_p^2 + y_p^2 = l_1^2(C_1^2 + S_1^2) + \ldots \\ +l_2^2(C_{12}^2 + S_{12}^2) + \ldots \\ +2l_1l_2(C_1C_{12} + S_1S_{12}) \end{aligned} \qquad (13)$$

Sabiendo que $C_1^2 + S_1^2 = 1$ y $C_{12}^2 + S_{12}^2 = 1$, se puede reducir más la ecuación (13) como sigue:

$$x_p^2 + y_p^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2 \tag{14}$$

Una vez teniendo lo más simplificada posible, despejamos C_2:

$$\begin{aligned} l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2 &= x_p^2 + y_p^2 \\ 2l_1 l_2 C_2 &= x_p^2 + y_p^2 - l_1^2 - l_2^2 \\ C_2 = \cos(\theta_2) &= (x_p^2 + y_p^2(-l_1^2 + l_2^2))/(2l_1 l_2) \end{aligned} \tag{15}$$

Se obtiene el ángulo $theta_2$ de la siguiente manera:

$$\theta_2 = \cos^{-1}[(x_p^2 + y_p^2(-l_1^2 + l_2^2))/(2l_1 l_2)] \tag{16}$$

En la figura 5, se muestra la simulación de la cinemática inversa considerando los parámetros $l_1 = 10$,$l_2 = 10$,$x_0 = 0$,$y_0 = 0$. Después, asignando diferentes valores de $x_p = \{-10, -5, 5, 10\}$ y $y_p = \{-5, -5, -5, -5\}$ para observar el movimiento de los ángulos que calcula Matlab con las ecuaciones de la cinemática inversa según los valores de la posición del efector final.

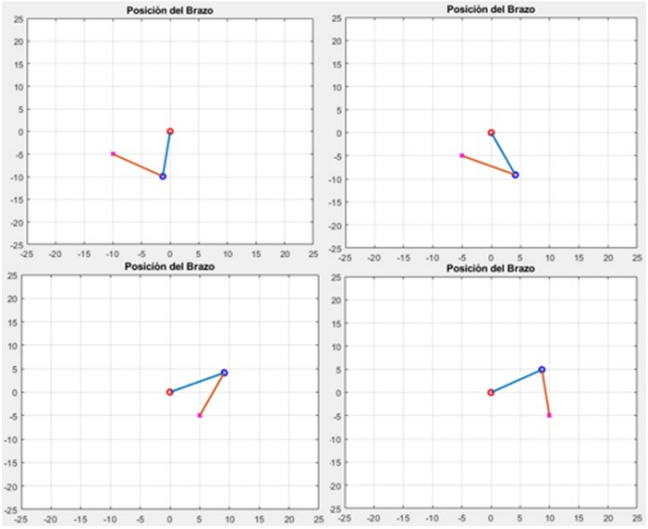


Figura 5: *Simulación de la posición del brazo utilizando la cinemática inversa.*

IV. Movimiento y trayectoria predefinida del robot

Cuando una carga bajo control debe seguir un camino específico para llegar desde su punto de partida hasta su punto de parada, los movimientos de los ejes deben estar coordinados o interpolados. Es común hablar de dos tipos de interpolación: lineal y circular.

IV.1. Interpolación lineal

La interpolación lineal es la capacidad de un sistema de control de movimiento que tiene dos o más ejes para mover la carga de un punto a otro en línea recta. El controlador de movimiento debe determinar la velocidad de cada eje para que pueda coordinar sus movimientos. La interpolación lineal verdadera requiere que el controlador de movimiento modifique la aceleración del eje, pero algunos controladores se aproximan a la interpolación lineal verdadera con perfiles de aceleración programados. La ruta puede estar en un plano o ser tridimensional. Para la interpolación lineal en términos de código G se utiliza comunmente G01. La Fórmula de interpolación lineal es el proceso de encontrar un valor entre dos puntos en una línea. Esta herramienta, la interpolación, no solo es útil en estadísticas, sino que también es útil en ciencia, negocios o en cualquier momento en que sea necesario predecir valores que se encuentren dentro de dos puntos de datos existentes. Considerando que se quiere realizar un movimiento en un plano desde el punto inicial $P_1 = (x_1, y_1)$ al punto final $P_2 = (x_2, y_2)$. El valor desconocido en un punto se encuentra usando esta fórmula:

$$y = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x - x_1) + y_1 \tag{17}$$

donde la ecuación (17) representa a la ecuación de la recta de la forma $y = mx + b$ con pendiente $m = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}$ y cruce por $b = y_1$, el término $x - x_1$ se debe a que la recta no está trazada sobre las coordenadas (0,0), sino que a partir del punto inicial (x_1, y_1). Consideremos por ejemplo que el $P_1 = (0, 3)$ y $P_2 = (6, 3)$ como se muestra en la Figura 6 donde el punto P_1 se ilustra con un cuadro de color rojo y el punto P_2 con un círculo de color azul.

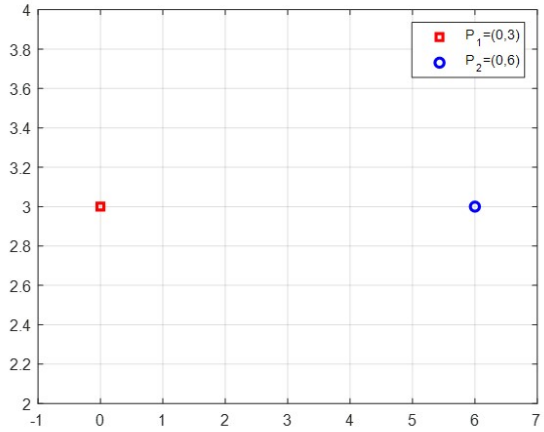
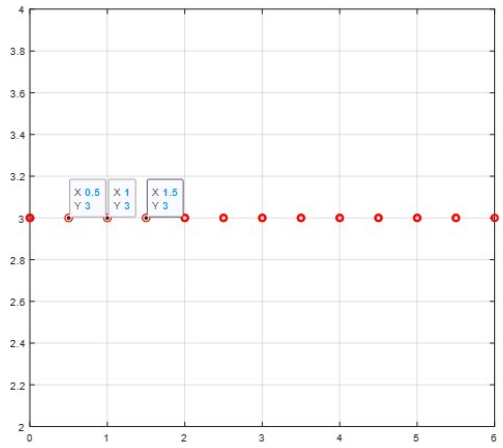
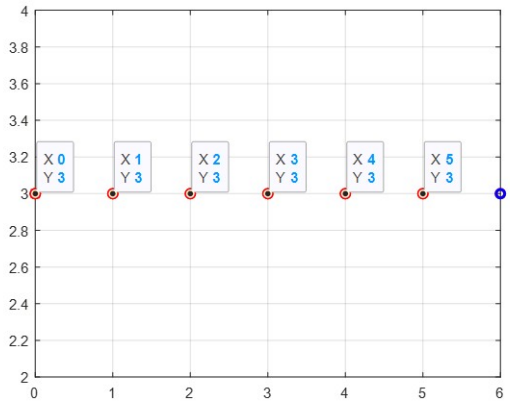


Figura 6: *Definición del punto inicial y punto final de la interpolación lineal.*

Podemos definir una resolución en x como $\delta x =$



(a) *Interpolación lineal con* $\delta x = 0.5$



(b) *Interpolación lineal con* $\delta x = 1$

Figura 7: *Interpolación lineal entre dos puntos con diferente resolución* δx.

$\{0.5, 1\}$, utilizando la ecuación (17) encontramos los puntos δy. Como se muestra en la Figura 7 cuanto menor es el valor de δx, la interpolación se realiza en puntos más cercanos, podemos llamar al valor δx como la resolución de la interpolación.

Ahora bien, cuando utilizamos la interpolación para realizar el movimiento del robot, debemos ajustar que el movimiento siempre tenga una misma resolución cualquiera sea el sentido, en el caso por ejemplo de $P_1 = (6, 6)$ y $P_2 = (10, 9)$ se realiza un movimiento en diagonal, entonces debemos ajustar el valor δ_x para que se respete la resolución en la trayectoria dada. Esto se puede realizar obteniendo la distancia del movimiento en diagonal, la cual se define por el teorema de Pitágoras por $c = \sqrt{a^2 + b^2}$. Donde c representa la longitud de la hipotenusa, a y b son los lados del cateto.

Para nuestro caso particular se definen como $a = |y_2 - y_1|$ y $b = |x_2 - x_1|$, donde $|x|$ representa el valor absoluto de x. En el caso que se comentó donde $P_1 = (6, 6)$ y $P_2 = (10, 9)$, los valores de los catetos están dados por $a = |9 - 6| = 3$ y $b = |10 - 6| = 4$ por ende $c = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5$. Realizando este factor de ajuste siempre que $y_1 \neq x_2$ tenemos el resultado que se muestra en la Figura 8. Se observa que en este caso $\delta x = 1$ ya que tenemos 5 puntos desde el punto inicial al punto final lo que corresponde al valor calculado de $c = 5$, entonces $\delta x_{ajustado}$ está dado de manera general por:

$$\delta x_{ajustado} = \frac{\delta x}{(c/b)} \tag{18}$$

Tenemos entonces en nuestro caso particular, $\delta x_{ajustado} = \frac{1}{5/4} = 0.8$ como se observa en la Figura 8 donde los incrementos en x están dados por $x = \{6, 6.8, 7.6, 8.4, 9.2, 10\}$.

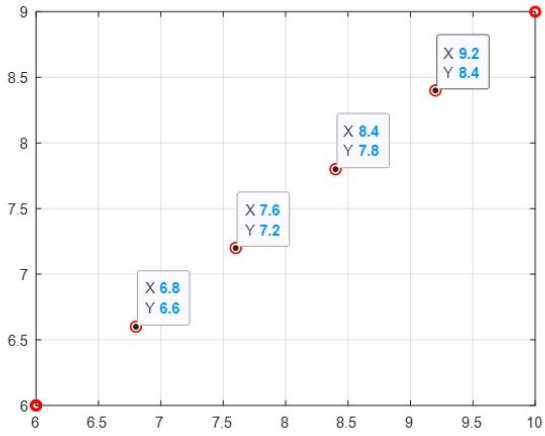


Figura 8: *Interpolación lineal entre dos puntos con ajuste de* δx.

La fórmula de interpolación de la ecuación (17) se puede utilizar siempre y cuando $x_1 \neq x_2$, ya que si $x_1 = x_2$ se tiene una indeterminación a la hora de calcular la pendiente m, que de ahora en adelante le renombraremos como m_x por el hecho de que se calcula la pendiente con respecto al eje x. Para encontrar la solución en los casos donde $x_1 = x_2$, se puede realizar la interpolación a través del eje de las ordenadas. La fórmula de interpolación, despejando la ecuación (17) entonces estará dada por:

$$x = \frac{(x_2 - x_1)(y_1 - y)}{(y_1 - y_2)} + x_1 \tag{19}$$

donde $m_y = -m_x = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_2 - x_1)}$, así como la resolución $\delta y = \delta x$. En la figura 9 se muestra la interpolación en el eje y utilizando $\delta y = 1$.

En la Figura 10 se muestra la interpolación entre los puntos $P_1 = (6, 6)$ y $P_2 = (14, 12)$ con $\delta x = 2$, se definen los puntos de interpolación con una "x" y se puede

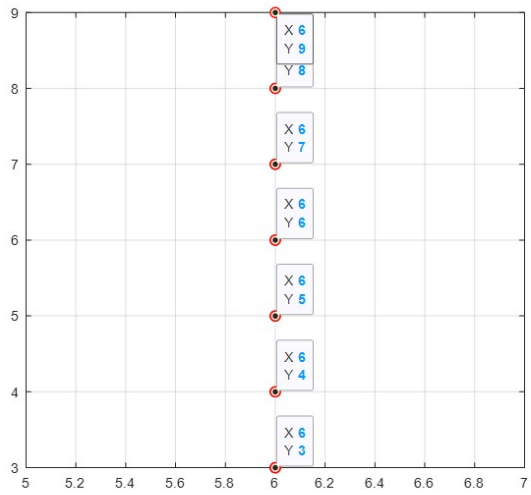


Figura 9: *Interpolación lineal en el eje y considerando* $\delta y = 1$.

observar el movimiento del brazo robot graficando los ángulos θ_1 y θ_2 mediante la obtención de la cinemática inversa en cada punto de interpolación. Cabe recalcar que cuanto menor es la resolución (δx) más suaves serán los movimientos del robot.

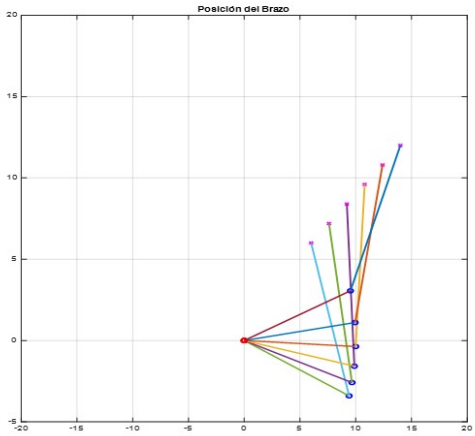


Figura 10: *Movimiento de interpolación lineal del brazo robot de 2DoF.*

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos en cada punto de interpolación y los valores de los ángulos θ_1 y θ_2 obtenidos de la cinemática inversa, puede observar que en este caso el $\delta x = 2$ y $\delta x_{ajustado} = 1.6$.

IV.2. Interpolación circular

La interpolación circular es la capacidad de un sistema de control de movimiento que tiene dos o más ejes para

Tabla 2: *Valores para el movimiento del brazo robot mediante interpolación*

Valor en eje x	Valor en eje y	θ_1	θ_2
6.0	6.0	-19.89	129.79
7.6	7.2	-14.98	116.87
9.2	8.4	-9.07	102.94
10.8	9.6	-2.1	87.47
12.4	10.8	6.35	69.39
14.0	12.0	17.81	45.57

mover la carga alrededor de una trayectoria circular. La interpolación circular se puede realizar en dos sentidos, en sentido horario y en sentido antihorario. A la interpolación en sentido horario se le identifica con el código G mediante G02 y a la interpolación en sentido antihorario se le identifica con el código G03.

Para la interpolación circular se considera (x_i, y_i) la posición inicial (start point), R el radio del centro del círculo (center) y (x_f, y_f) la posición final (end point) como se muestra en la figura 11.

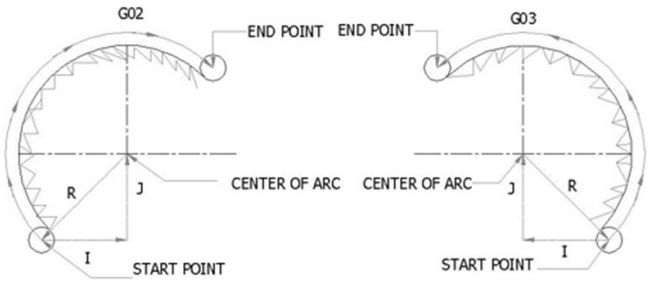


Figura 11: *Interpolación circular.*

A continuación, se describe paso a paso el procedimiento para realizar la interpolación circular:

1. Se calcula el centro de la circunferencia, (x_c, y_c), a partir de las coordenadas iniciales y finales del arco:

$$x_c = \frac{x_i + x_f}{2}$$
$$y_c = \frac{y_i + y_f}{2} \tag{20}$$

2. Se determinan el ángulo inicial ϕ_i y el ángulo final ϕ_f mediante la función arco-tangente de dos argumentos:

$$\phi_i = \text{atan2}(y_i - y_c,\, x_i - x_c)$$
$$\phi_f = \text{atan2}(y_f - y_c,\, x_f - x_c) \tag{21}$$

Obsérvese que en este caso se utiliza la función arco-tangente de dos parámetros, atan2(a, b), la cual permite determinar correctamente el cuadrante del ángulo resultante de acuerdo con el signo de cada parámetro.

3. Determinar la dirección de rotación, ya sea en sentido horario o antihorario. Para ello, se realiza la siguiente verificación:

$$\begin{aligned} &\text{Si } \phi_i < \phi_f, \text{ la dirección es antihoraria} \\ &\text{Si } \phi_i > \phi_f, \text{ la dirección es horaria} \end{aligned} \tag{22}$$

4. Generar los puntos de interpolación, es decir, los puntos intermedios. Conociendo los ángulos ϕ_i y ϕ_f, se divide el arco en segmentos iguales para obtener el ángulo intermedio ϕ_m. Para respetar la velocidad de movimiento respecto a la interpolación lineal, se ajusta δx considerando la longitud del arco formado entre los puntos (x_i, y_i) y (x_f, y_f), y así obtener $\delta\phi_m$, que corresponde al incremento angular en la interpolación circular. La longitud del arco se calcula como:

$$L_{\text{arco}} = 2\pi R \frac{|\phi_i - \phi_f|}{360} \tag{23}$$

5. Habiendo calculado la longitud del arco, se determina la cantidad de divisiones o ángulos a recorrer entre ϕ_i y ϕ_f:

$$N_{\text{div}} = \frac{L_{\text{arco}}}{\delta x} \tag{24}$$

6. Se encuentra el incremento angular $\delta\phi_m$ como sigue:

$$\delta\phi_m = \frac{|\phi_i - \phi_f|}{N_{\text{div}}} \tag{25}$$

7. Teniendo $\delta\phi_m$, se calcula el primer ángulo intermedio:

$$\phi_m = \phi_i + \delta\phi_m, \quad \forall m \in \{1, 2, \ldots, N_{\text{div}}\} \tag{26}$$

8. A partir de ϕ_m, se calculan las coordenadas de los puntos intermedios (x_m, y_m):

$$\begin{aligned} x_m &= x_c + R\cos(\phi_m) \\ y_m &= y_c + R\sin(\phi_m) \end{aligned} \tag{27}$$

9. Finalmente, con las coordenadas del punto intermedio (x_m, y_m) al cual se desea mover desde (x_i, y_i) hasta (x_f, y_f), se calcula la cinemática inversa para obtener los valores de los ángulos articulares correspondientes, ϕ_1 y ϕ_2, que definen el movimiento de los eslabones.

V. Implementación y Resultados

La planificación de trayectorias tiene como objetivo controlar el movimiento del brazo robótico a lo largo de una trayectoria definida, garantizando un seguimiento preciso de dicha ruta. Este proceso constituye uno de los aspectos fundamentales en el control de trayectoria de un brazo manipulador. En la Figura 12 se ilustra el procedimiento seguido para la planeación y control de trayectorias del brazo robot.

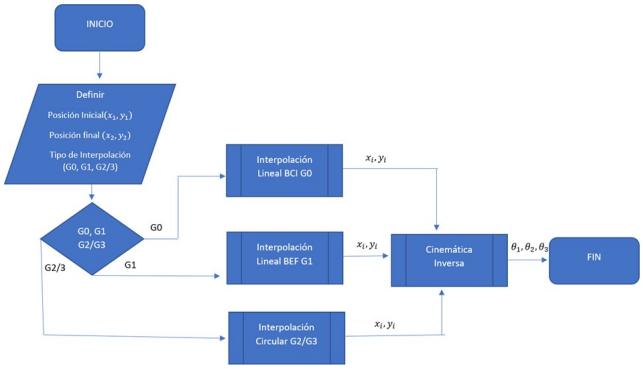


Figura 12: *Diagrama de flujo de la planeación de trayectorias del brazo robot.*

Se observa que al principio se deben definir las posiciones, tanto inicial en el punto (x_i, y_i) y la posición final en el punto (x_f, y_f), obsérvese que no se define la posición en el eje z, debido a que este va a depender del tipo de interpolación. En la interpolación lineal basada en coordenadas internas (BCI), se debe definir la posición z para levantar el brazo robot, por otro lado, en la interpolación lineal basada en el efector final (BEF) se debe definir posición z para bajar el brazo robot y realizar el trabajo. Después de las posiciones de paso en la interpolación definidas por (x_m, y_m) se obtiene la cinemática inversa para calcular los ángulos θ_1,θ_2 y θ_3.

Como se observa en la Figura 12, para poder realizar la interpolación a considerar en la trayectoria del robot se requiere la posición inicial y final, así como el tipo de movimiento referente a:

- G0: Movimiento rápido de interpolación BCI.
- G1: Interpolación lineal BEF.
- G2/3: Interpolación circular BEF.

En la figura 13 se muestra que se utilizará de ejemplo en donde se definen las dimensiones y los movimientos a través del Código G.

A partir de la figura anterior, se define el código G resultante. Esto se realiza definiendo la posición inicial, final y el tipo de interpolación necesario en cada caso. En la Tabla 3 se observa este proceso de obtención del código G a partir de la figura 13.

En la Figura 14 se muestra la simulación en el software NC Corrector, el cual es un editor y visualizador gratuito de programas CNC (código G) que permite validar gráficamente las trayectorias generadas a partir de instrucciones G-code. En esta simulación es posible corroborar que el código G ha sido ingresado correctamente para cumplir

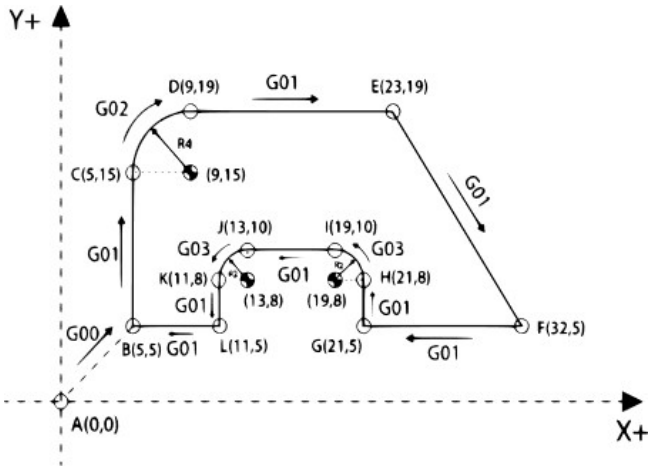


Figura 13: *Trayectoria base utilizada para la generación del código G del robot SCARA de 2 grados de libertad.*

Tabla 3: *Posición inicial, final y código G de los puntos de la Figura 13*

Posición Inicial	Posición Final	Código G
(0,0)	(5,5)	G0 X5 Y5 Z1
(5,5)	(5,15)	G1 X5 Y15 Z-1
(5,15)	(9,19)	G2 X9 Y19 I4 J0
(9,19)	(23,19)	G1 X23 Y19
(23,19)	(32,5)	G1 X32 Y5
(32,19)	(21,5)	G1 X21 Y5
(21,5)	(21,8)	G1 X21 Y8
(21,8)	(19,10)	G3 X19 Y10 I-2 J0
(19,10)	(13,10)	G1 X13 Y10
(13,10)	(11,8)	G3 X11 Y8 I0 J-2
(11,8)	(11,5)	G1 X11 Y5
(11,5)	(5,5)	G1 X5 Y5 Z1

con la trayectoria propuesta en la Figura 13. Cabe destacar que el uso del parámetro Z1 no corresponde a un movimiento real en el eje vertical del robot SCARA, sino que se emplea con un propósito representativo dentro del entorno de simulación. Este valor se utiliza para iniciar la trayectoria con una interpolación basada en coordenadas internas (BCI), lo cual simula el desplazamiento libre del efector hacia la posición inicial sin interacción con el plano de trabajo. Posteriormente, una vez alcanzado el punto de inicio, se activa la interpolación basada en el efector final (BEF), donde se definen los movimientos efectivos sobre el plano XY mediante los comandos G1, G2 y G3. Esta diferenciación entre la fase inicial (BCI) y la fase operativa (BEF) permite representar adecuadamente el ciclo completo de movimiento del robot dentro del software CNC, facilitando tanto la interpretación de los comandos G-code como la validación visual del algoritmo de planeación implementado.

En la figura 15 se muestra la simulación en Matlab de

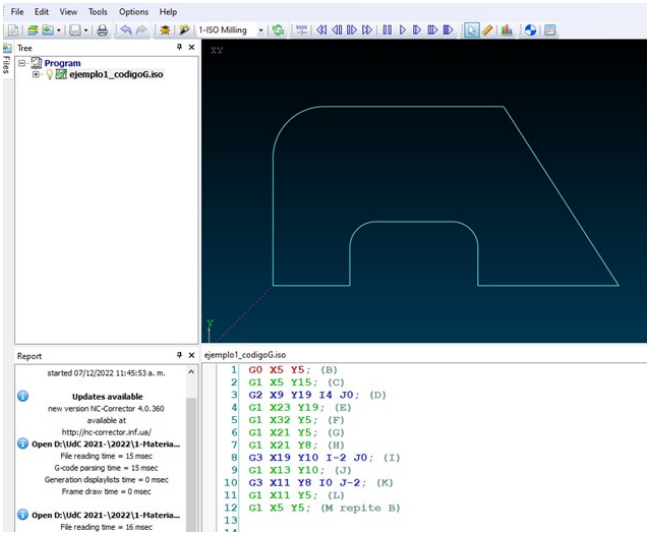


Figura 14: *Simulación de código G en el software NC Corrector.*

la interpolación lineal y circular, en línea punteada se observa el movimiento G0, en línea continua de color rojo se muestra el movimiento G1 y en línea continua color azul se muestra el movimiento G2/G3 las unidades se consideraron en cm por lo tanto se tuvieron que convertir a mm como se observa que el movimiento a la primera posición es $(50, 50)$.

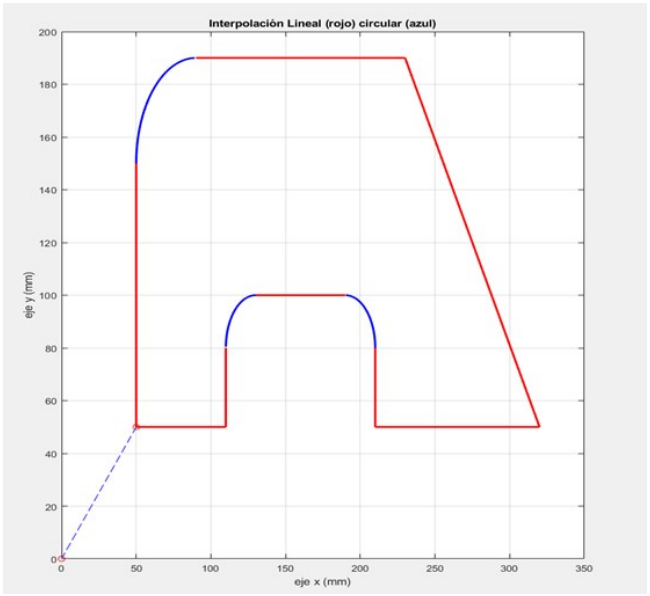


Figura 15: *Simulación en Matlab de interpolación lineal y circular.*

VI. Conclusiones

En este artículo, se abordó una metodología para la planificación de trayectorias en robots SCARA de 2 grados de libertad, resaltando su aplicabilidad en entornos académicos, especialmente en el ámbito de la robótica y mecatrónica. La detallada descripción de la cinemática del robot, la implementación de algoritmos de interpolación lineal y circular, y la integración con el código G para proporcionar un funcionamiento correcto de un robot para seguir trayectorias suaves. Los ejemplos prácticos en Matlab permiten visualizar y experimentar con conceptos abstractos, facilitando la comprensión de los principios fundamentales de la planificación de trayectorias en el contexto de la robótica. Este enfoque didáctico, centrado en la aplicación práctica, no solo transmite los aspectos teóricos de la planificación de movimientos, sino que también promueve el desarrollo de habilidades prácticas para abordar desafíos reales referente al movimiento de Robots. La versatilidad de esta metodología puede enriquecer los programas académicos al proporcionar herramientas prácticas y conocimientos esenciales para resolver problemas en constante evolución en estos campos.

Referencias

[1] G. F. Chen et al. «SCARA robot control system design and trajectory planning: a case study». En: *Advances in Electrical Engineering and Automation* AISC Vol. 139 (2012), págs. 171-176.

[2] Patrik Axelson. *Simulation Model of a 2 Degrees of Freedom Industrial Manipulator*. Technical Report. Automatic Control at Linköpings Universitet, 2011.

[3] Zhang Zhiyong et al. «Picking Robot Arm Trajectory Planning Method». En: *Sensors and Transducers* 162 (ene. de 2014), págs. 11-20.

[4] Giovanni Incerti. «Motion Planning of SCARA Robots for Trajectory Tracking». En: *International Science Index on Excellence in Research and Innovation for Humanity* (2015).

[5] Jorge Luis Aroca Trujillo, Alexander Pérez-Ruiz y Ruthber Rodriguez Serrezuela. «Generation and Control of Basic Geometric Trajectories for a Robot Manipulator Using CompactRIO». En: *Journal of Robotics* 2017 (2017), págs. 1-11.

[6] Shanshan He et al. «A tolerance constrained G2 continuous path smoothing and interpolation method for industrial SCARA robots». En: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 63 (2020), pág. 101907. ISSN: 0736-5845.

[7] Ye Dai et al. «A Review of Spatial Robotic Arm Trajectory Planning». En: *Aerospace* 9.7 (2022), pág. 361.

[8] Mark W Spong, Seth Hutchinson y Mathukumalli Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. 2nd. John Wiley & Sons Inc., 2020.

[9] J. L. Meriam y L. G. Kraige. *Mecánica para Ingenieros. Dinámica II Volumen 2*. Editorial Reverté S. A., 1998.

[10] John J. Craig. *Robótica*. México: Pearson Education, 2006.

[11] M. H. Hernández Ordoñez et al. *Robótica: análisis, modelado, control e implementación*. Omnia Publisher SL, 2015.

[12] E. G. Armada. *Los robots y sus capacidades*. CSIC y Catarata, 2022.

$DIFU_{100}ci@$
Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías
Vol. 17, No. 2, Mayo - Agosto 2023
ISSN:2007-3585
Artículo arbitrado
Publicado: 31 de agosto de 2023

IoT monitoring node for satellite modem status

Nodo IoT para monitoreo del estado de un módem satelital

Juan Pablo Morales-Alvarez[*1], **Enrique Cruz-Sánchez**[1], **Jesús Fernando Vizcarra-Guerrero**[1], **Gerardo Ochoa-García**[1], and **Víktor Iván Rodríguez-Abdalá**[2]

[1] *Tecnológico Nacional de México/I.T. de La Paz,*
Departamento de Metalmecánica,
Blvd. Forjadores, La Paz, B.C.S, México, 23080.
{juan.ma,l18310694,l18310162,l18310205}@lapaz.tecnm.mx
[2] *Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica,*
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,
Campus Siglo XXI, Zacatecas, Zac., Mexico, 98160.
abdala@uaz.edu.mx

Abstract

This paper presents the development of an IoT node for the remote monitoring and management of a satellite modem, a required device for scientific data transmission in remote areas. The proposed system was designed to address recurrent failures in data delivery from a seismograph located in San Evaristo, B.C.S., Mexico, where access to technical personnel is limited and physical intervention is costly and time-consuming. The node, based on the ESP32 DevKit V1 board, employs Wi-Fi as the communication protocol and integrates light-dependent resistors (LDR) to detect the modem's LED indicators, combined with a relay-controlled circuit that allows remote rebooting of the modem through the Cayenne IoT platform. Field tests demonstrated reliable performance: an average transmission latency of 420 ms, LED detection effectiveness of 98.5%, and 100% success in remote reboots, with the system operating continuously for 72 hours at 99.2% availability. These results validate the feasibility of using IoT-based monitoring for satellite communication equipment, highlighting its potential to reduce downtime, increase data availability for scientific research, and provide a scalable solution for remote monitoring in isolated environments.

Keywords— IoT, Fault Detection, Remote monitoring

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un nodo IoT para el monitoreo y la gestión remota de un módem satelital, dispositivo necesario para la transmisión de datos científicos en zonas remotas. La propuesta se orienta a resolver fallas recurrentes en la entrega de datos desde un sismógrafo ubicado en San Evaristo, B.C.S., México, donde el acceso de personal técnico es limitado y la intervención local resulta costosa y tardada. El nodo, implementado con la placa ESP32 DevKit V1, utiliza Wi-Fi como protocolo de comunicación e integra fotorresistencias (LDR) para detectar los indicadores LED del módem, además de un circuito con relevador que permite el reinicio remoto a través de la plataforma IoT Cayenne. Las pruebas en campo demostraron un desempeño confiable: latencia de transmisión promedio de 420 ms, efectividad de detección de LEDs del 98.5 %, y 100 % de éxito en reinicios remotos, con una disponibilidad del 99.2 % en 72 horas de operación continua. Estos resultados validan la viabilidad del monitoreo IoT aplicado a equipos de telecomunicaciones satelitales, destacando su potencial para reducir tiempos de inactividad, incrementar la disponibilidad de datos científicos y ofrecer una solución escalable para entornos aislados.

Palabras clave— IoT, Detección de fallas, Monitoreo remoto

I. Introducción

El Internet de las Cosas (IoT, del inglés Internet of Things) es un referente para el monitoreo remoto, ya que permite la conectividad de redes tanto de corto como de largo alcance. El IoT es una red de dispositivos que comunican datos de forma bidireccional. A diferencia de otras redes, estas son de bajo consumo energético y se comunican a un punto de acceso generalmente en un salto, así los datos son enviados a una plataforma para ser consultados por los usuarios a través de Internet.

En este proyecto se diseñó e implementó el monitoreo remoto del estado de un módem satelital basado en IoT. Se utilizó la placa de desarrollo ESP32 DevKit V1 [1] para conectarse a un servidor de red (NS, del inglés Network Server) basado en *cayenne.mydevices.com*, de la compañía myDevices [2]. Con el objetivo de monitorear remotamente un módem satelital, se observaron los LEDs de estado de dicho módem; asimismo, se realizó el control remoto de encendido y apagado.

El protocolo de comunicación utilizado es Wi-Fi, ya que la placa ESP32 DevKit V1 puede conectarse a red Wi-Fi. La ubicación del nodo IoT está dentro del alcance de un segundo módem satelital que conecta a Internet vía Wi-Fi, al cual el nodo IoT se enlaza para subir el estado de los LEDs del módem satelital del sismógrafo al NS.

El módem satelital que se monitorea es el iQ 200 Desktop, al servicio del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) - Unidad La Paz [3], el cual se renta a GlobalSat México [4] para subir los datos del sismógrafo ubicado en San Evaristo, B.C.S.

El CICESE Unidad La Paz, carece de un sistema de monitoreo remoto a su módem satelital utilizado con el sismógrafo de San Evaristo, B.C.S. Ante lo cual no es posible identificar el tipo de falla cuando deja de recibir datos del sismógrafo. Las fallas pueden tener dos orígenes: 1) a un estado de reposo no deseado del módem, ocasionado por las variaciones en la energía del banco de baterías, o 2) a problemas de conectividad de la red GlobalSat.

Para el primer tipo de falla, ajena a la red GlobalSat, donde el módem entra en estado de reposo no deseado por las variaciones de energía, la solución es que debe ser reiniciado. Sin la posibilidad de un reinicio remoto, el personal de CICESE debe acudir desde la ciudad de La Paz, B.C.S. a la ubicación del módem satelital para su reinicio local. Por otra parte, los problemas de conectividad con la red Globalsat, pueden ser identificados mediante el estado de los LEDs y así reportar con el servicio técnico que ofrece la empresa. El nodo IoT de monitoreo remoto del estado de los LEDs del módem satelital, ofrece la posibilidad de identificar estos tipos de fallas y tomar decisiones.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se describen los trabajos relacionados. En la Sección III, el modelo de sistema, se detalla la implementación del nodo IoT, se describen el servidor y los paneles para monitoreo remoto. En la Sección IV se describen las pruebas de transmisión realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, en la Sección V se muestran las conclusiones del presente trabajo.

II. Trabajos relacionados

En [5] describen un sistema IoT para el monitoreo de tanques de agua utilizando tecnología IoT enfocado en el monitoreo de la calidad del agua. Este sistema utiliza Arduino junto con sensores de pH, TDS, turbidez y un módulo Wi-Fi para la transmisión inalámbrica de datos. No solo proporciona un monitoreo en tiempo real, sino que también mejora la eficiencia en el uso del agua y la energía, gracias a su capacidad para controlar automáticamente el flujo de agua y su diseño que integra energía solar, lo que lo hace sostenible y eficiente. Esta solución representa una mejora significativa para la gestión de recursos hídricos, especialmente en áreas donde el acceso a agua limpia y segura es crítico.

El trabajo en [6] se centra en mejorar la seguridad y la gestión de las tapas de alcantarillas en zonas urbanas mediante el uso de tecnología IoT. Wi-Fi es el protocolo principal de comunicación; el sistema monitorea en tiempo real varios parámetros como temperatura, presencia de gases y estado de la tapa de la alcantarilla. Un objetivo del estudio es la efectividad del sistema en la prevención de accidentes y la mejora de la gestión de alcantarillas, reduciendo los riesgos para los trabajadores de saneamiento y del público.

En [7] exploran la distribución de recursos y el análisis del consumo de energía en dispositivos móviles utilizando técnicas de aprendizaje automático. La aplicación de este estudio es mejorar la eficiencia energética y la gestión de recursos en dispositivos móviles conectados, lo cual es crucial para extender la vida útil de la batería y optimizar el rendimiento del sistema en entornos de dispositivos móviles. Utilizando una Raspberry Pi como interfaz de monitoreo web, el sistema permite la conexión inalámbrica de dispositivos móviles Android a través de una conexión de red Wi-Fi. Se describe que el uso de un clasificador XGBoost implementado en la Raspberry Pi mejora la asignación de recursos y la gestión del estado de inactividad de los dispositivos basándose en patrones de uso en tiempo real, lo que contribuye significativamente a la sostenibilidad y el rendimiento de los entornos móviles.

A diferencia de los trabajos revisados, el sistema propuesto se orienta a la supervisión y control de un módem

*Autor de correspondencia

satelital, un dispositivo crítico para la transmisión de datos científicos en entornos remotos. Mientras que las soluciones previas se centran en la gestión de recursos hídricos mediante IoT y energía solar [5], la seguridad urbana a través del monitoreo de alcantarillas [6], o la optimización energética en dispositivos móviles con técnicas de aprendizaje automático [7], nuestro proyecto introduce una aplicación específica en telecomunicaciones satelitales. Esta comparación evidencia que la propuesta comparte con los trabajos relacionados la integración IoT para mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas, y además aporta un método práctico para detectar fallos y realizar el reinicio remoto de un módem satelital, lo cual representa un valor agregado en contextos donde la disponibilidad de personal técnico y el acceso físico al equipo son limitados.

III. Modelo de sistema

La solución propuesta consiste en un nodo IoT diseñado para el monitoreo remoto de los LEDs de estado de un módem satelital. Este nodo está implementado utilizando un microcontrolador ESP32 DevKit V1 (DOIT), seleccionado por su bajo consumo de energía y conectividad inalámbrica. La detección del estado de los LEDs se realiza mediante fotorresistencias (LDR, del inglés Light Dependent Resistors) alineadas con los indicadores luminosos del módem. El microcontrolador digitaliza la intensidad de la luz a través de un convertidor analógico–digital (ADC, del inglés Analog to Digital Converter) de 12 bits, aplicando un umbral de decisión para clasificar el estado del LED como ENCENDIDO o APAGADO. El estado de los LEDs se envía a la plataforma *cayenne.mydevices.com* vía Wi-Fi, lo que permite la supervisión en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado a Internet.

El nodo muestrea periódicamente la intensidad de los LEDs y transmite los datos procesados al servidor de la plataforma, la cual emplea el protocolo MQTT (del inglés Message Queuing Telemetry Transport). Además, Cayenne permite configurar alarmas y notificaciones, funcionando de manera integrada como NS y servidor de aplicación (AS, del inglés Application Server).

La Fig. 1 muestra la arquitectura del sistema, compuesta por el nodo IoT con sensores, el módem satelital, el servidor de aplicación y los dispositivos finales para la consulta de los datos.

En el diseño del sistema se consideraron parámetros cuantitativos que permiten dimensionar su desempeño. El ESP32 DevKit V1 integra dos CPU Xtensa LX6 a 240 MHz, un ADC de 12 bits (0–4095) y conectividad Wi-Fi de 2.4 GHz. Para la detección del estado de los LEDs se configuró un umbral cercano a 3500 unidades digitales, lo que asegura una clasificación confiable. El sistema

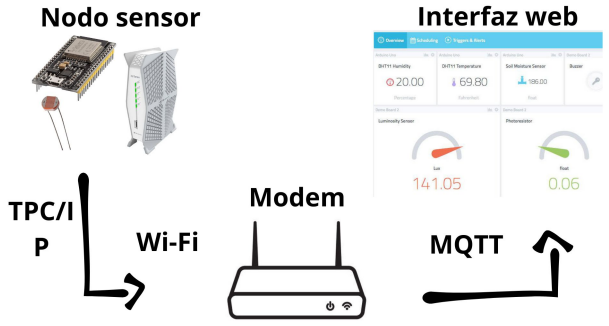


Figura 1: *Diagrama general de la arquitectura del sistema IoT.*

energético toma la alimentación de 24 V del módem, reducida a 6 V mediante un regulador LM2596, con respaldo de dos baterías Li-Po de 1200 mAh gestionadas por un cargador TP4056 y estabilizadas a 5 V con un elevador DC-DC. El reinicio remoto se implementa mediante un relevador RAS-0510 controlado por un transistor 2N4401. Finalmente, todos los componentes se integraron en una carcasa impresa en 3D con material ABS (del inglés Acrylonitrile Butadiene Styrene), diseñada a medida para reducir interferencias lumínicas y proteger el dispositivo en campo.

Tabla 1: *Especificaciones técnicas principales del sistema IoT propuesto*

Componente	Características técnicas
ESP32 DevKit V1	Doble núcleo Xtensa LX6, hasta 240 MHz; ADC de 12 bits (0–4095); Wi-Fi 2.4 GHz integrado; 30 pines disponibles
Sensores (LDR)	Rango típico: ∼1 MΩ en oscuridad, ∼1 kΩ con alta iluminación; umbral de detección fijado en 3500 (sobre 4095)
Regulación de energía	Entrada: 24 V; Regulador LM2596 a 6 V; Cargador TP4056 para baterías Li-Po; Elevador DC-DC a 5 V estable
Baterías	2 celdas Li-Po modelo 103040, 1200 mAh cada una; respaldo energético ante fallas de alimentación
Actuador (Relevador RAS-0510)	Activación a 5 V, corriente nominal de 10 A; controlado con transistor 2N4401 para reinicio remoto del módem
Carcasa 3D	Material ABS; diseño a medida en SolidWorks; protección contra interferencia lumínica externa

Las especificaciones técnicas principales del sistema se presentan en la Tabla 1.

III.1. Nodo IoT

El diseño e implementación del nodo IoT se realizó a partir del microcontrolador ESP32 y componentes auxiliares integrados en un circuito electrónico propio. Se desarrolló un diagrama esquemático que se muestra en la Fig. 2 y, posteriormente, un diseño de PCB (del inglés Printed Circuit Board).

III.2. Módem

El módem satelital iQ 200 Desktop cuenta con dos puertos de red Gigabit Ethernet VLAN-aware y conectividad inalámbrica para acceso a Internet, transmisión de

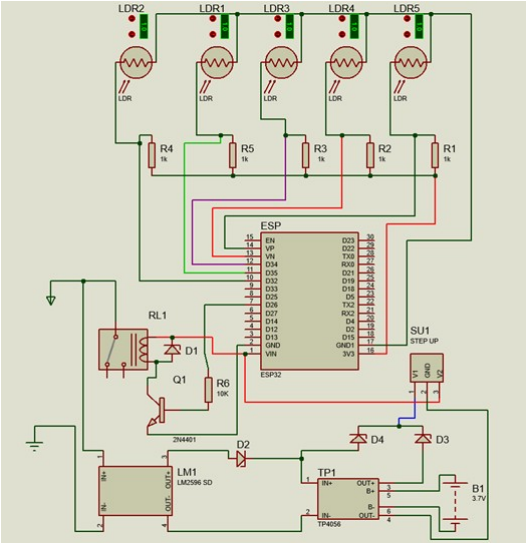


Figura 2: *Diagrama esquemático del nodo IoT.*

voz sobre IP (VoIP), video y multidifusión. Puede alcanzar velocidades de hasta 200 Mbps en modo L2oS (del inglés Layer 2 over Satellite) y es compatible con diversas configuraciones de ODU [8]. La Fig. 3 muestra los LEDs de estado del equipo.

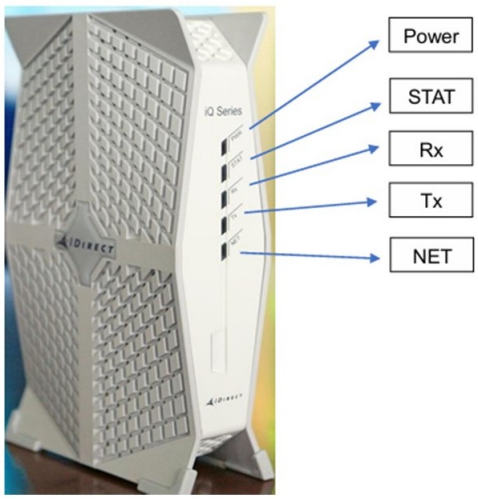


Figura 3: *Módem satelital iQ 200 y LEDs de estado.*

III.3. Servidor de aplicación

En la Fig. 4 se muestra la interfaz de la plataforma Cayenne, utilizada para registrar el nodo IoT mediante la opción *Bring your own thing*. Una vez registrado, se agregaron widgets que representan los sensores de luz y el actuador, permitiendo monitorear en tiempo real los LEDs del módem y controlar el reinicio remoto.

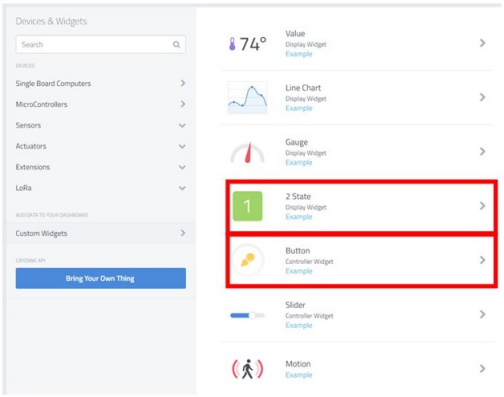


Figura 4: *Plataforma Cayenne y registro del nodo IoT.*

La Fig. 5 muestra el panel del sistema IoT, donde cada widget corresponde a un LED específico (Power, Status, Rx, Tx y NET). El icono *Relé* permite accionar el relevador para efectuar un reinicio remoto del módem.



Figura 5: *Panel de monitoreo del módem en Cayenne.*

III.4. Carcasa del nodo

En la Fig. 6 se muestra el modelo 3D de la carcasa impresa en ABS. Esta estructura se coloca sobre el módem iQ 200 Desktop para alinear las LDRs con los LEDs, proteger el nodo de la luz ambiental e integrar la placa electrónica, las baterías y el relevador. Se añadieron perforaciones para cables de alimentación y comunicación.

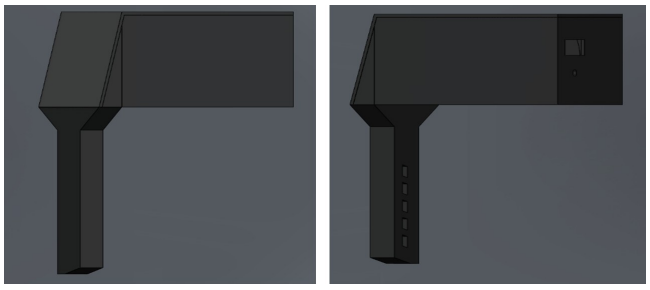


Figura 6: *Modelo 3D de la carcasa del nodo IoT.*

IV. Pruebas y resultados

El nodo IoT se instaló en el módem junto con la carcasa en la localidad de San Evaristo, B.C.S. (Fig. 7), a 130 km al norte de la ciudad de La Paz, B.C.S. Asimismo, se verificó desde la capital del estado que el envío de los estados de los LEDs del módem satelital a través del AS sea correcto y en tiempo real.

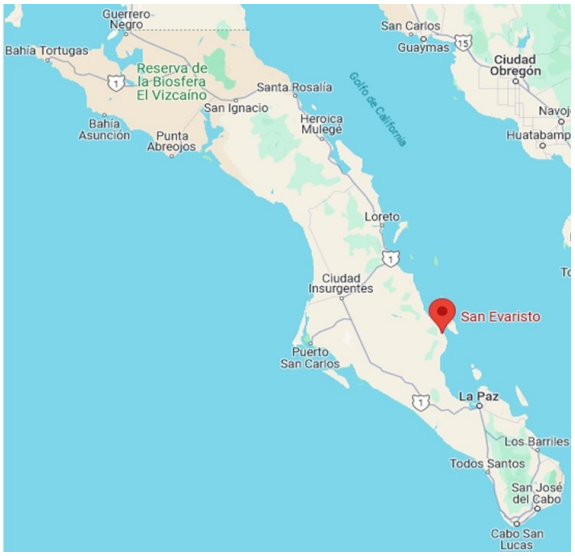
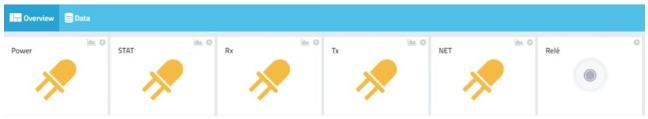
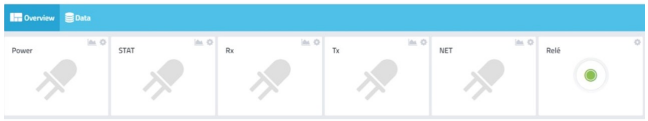


Figura 7: *Ubicación del nodo sensor.*



(a) *Panel de lectura en tiempo real LEDs encendidos.*



(b) *Panel de lectura en tiempo real LEDs apagados.*

Figura 8: *Paneles de los datos en* cayenne.mydevices.com.

El microcontrolador ESP32 realiza un muestreo periódico de los LEDs con un intervalo de 1 s. De esta forma, el sistema permanece en operación activa con espera entre muestras, sin entrar en un modo de bajo consumo (*sleep*). Los datos procesados son enviados inmediatamente a la plataforma *cayenne.mydevices.com*, lo que permite la visualización de los estados en tiempo casi real.

Durante las pruebas de campo se evaluaron los siguientes indicadores de desempeño:

- **Latencia de transmisión:** el tiempo promedio entre el cambio de estado de un LED en el módem y su visualización en Cayenne fue de aproximadamente 420 ms, con una desviación estándar de 35 ms en 50 pruebas.
- **Efectividad de detección de LEDs:** en 200 lecturas realizadas bajo distintas condiciones de iluminación ambiental, el sistema clasificó correctamente 197 de ellas, alcanzando una efectividad del 98.5 %.
- **Confiabilidad del reinicio remoto:** se efectuaron 15 intentos de conmutación del relevador RAS-0510, todos ellos exitosos (100 % de confiabilidad).
- **Disponibilidad del sistema:** durante 72 h de operación continua en campo, el nodo mantuvo una disponibilidad del 99.2 %, transmitiendo lecturas de manera constante.

La Fig. 8 presenta el panel de monitoreo en Cayenne: en la Fig. 8a se observan los LEDs del módem encendidos, indicando operación normal, mientras que en la Fig. 8b se muestra el LED de Power apagado debido a variaciones en el voltaje, lo que provocó la desactivación del resto de los indicadores. En este escenario, el reinicio se llevó a cabo mediante la activación del widget *Relé*, que cambia a color verde mientras el relevador permanece energizado y vuelve a apagarse una vez completado el reinicio.

V. Conclusiones

El proyecto demostró ser capaz de realizar el monitoreo y la gestión remota de un módem satelital en entornos remotos, ofreciendo una solución a los problemas de monitoreo y control de dispositivos críticos para la transmisión de datos científicos, en este caso un sismógrafo. La integración de tecnologías IoT, junto con el uso del protocolo Wi-Fi y la plataforma *cayenne.mydevices.com*, ha permitido una mejora en la capacidad de respuesta ante fallos del módem, reduciendo la necesidad de intervención in situ y reduciendo los tiempos de reacción ante contingencias, dada la posibilidad del reinicio remoto del módem del sismógrafo.

Como trabajo futuro se desea integrar un panel solar para dotar al sistema de autonomía energética, lo que ampliaría su sostenibilidad y permitiría su implementación en zonas aún más aisladas sin dependencia de la red eléctrica. Asimismo, el diseño e implementación de un AS propio representa una evolución estratégica, ya que proporcionaría independencia tecnológica, mayor seguridad en el manejo de los datos y disponibilidad local de la información incluso ante fallas en la conectividad a

Internet. Estas mejoras no solo consolidarían la robustez del sistema, sino que también abrirían la posibilidad de incorporar algoritmos avanzados de detección de fallos y análisis predictivo, ampliando así el potencial de aplicación de la propuesta a otros contextos de monitoreo científico y tecnológico.

Agradecimientos

Agradecemos a la dirección del CICESE Unidad La Paz por todo el apoyo brindado para poder llevar a cabo este trabajo, así como al TecNM/ITLP por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Referencias

[1] ESPRESSIF. *ESPRESSIF*. Último acceso: 16 marzo 2023. 2023. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.

[2] Cayenne. *Cayenne*. Último acceso: 13 marzo 2023. 2023. URL: https://developers.mydevices.com.

[3] CICESE. *Cicese.edu.mx*. https://www.cicese.edu.mx/welcome/acerca/. [Último acceso: 23 marzo 2023]. 2023.

[4] Globalsat. *Globalsat: Soluciones Satelitales*. https://web.globalsat.mx/. [Último acceso: 12 mayo 2023]. 2023.

[5] Sabeena K. y Haseena P. Y. «Design and Implementation of a Feasible Model for the IoT-Based Ubiquitous Healthcare Monitoring System for Rural and Urban Areas». En: *International Journal of Innovative Science and Research Technology* 8.11 (2023), págs. 212-217. ISSN: 2456-2165. URL: http://www.ijisrt.com.

[6] Komal Mahalunge et al. «An IoT Based Manhole Monitoring System». En: *International Journal for Scientific Research & Development* 8.4 (2020), págs. 16-18. ISSN: 2321-0613. URL: http://www.ijsrd.com/C_Article.php?manuscript=IJSRDV8I40196.

[7] I. Varalakshmi et al. «Design and Analysis of Energy Consumption using Machine Learning Resource Allocation on Mobile Gadgets». En: *International Journal of Computer Science and Development* 10 (2023), págs. 212-217. URL: http://www.ijcds.com/article_number=1571024322.

[8] Satcom. *Satcom*. Último acceso: 14 abril 2023. 2023. URL: https://www.satcomresources.com/iDirect-iQ-Desktop-Satellite-Modem.