THIẾT KẾ HỆ THỐNG ĐO CHỈ SỐ PM10, PM2.5 VÀ UV VỚI CÔNG NGHỆ LORA KẾT HỢP NB-IoT

DESIGN OF PM10, PM2.5 AND UV INDEX MONITORING SYSTEM USING LORA COMBINED WITH NB-IoT TECHNOLOGY

Hứa Nguyễn Đăng Thy[1], Vũ Ngọc Long[1], Trần Thanh Hải[1], Bùi Quang Vinh[1,*], Trần Chấn Quốc[2]

[1]Trung tâm Nghiên cứu triển khai Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh

[2]Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: hndthy.shtp@tphcm.gov.vn; vnlong.shtp@tphcm.gov.vn; tthai.shtp@tphcm.gov.vn;*bqvinh.shtp@tphcm.gov.vn; rayngu2005@gmail.com*

TÓM TẮT

Ô nhiễm không khí và bức xạ tử ngoại (UV) đang ngày càng trở thành mối nguy hại nghiêm trọng đối với sức khỏe cộng đồng và môi trường, đặc biệt tại các thành phố lớn và khu vực đô thị đông dân. Nghiên cứu này trình bày việc thiết kế và triển khai một hệ thống giám sát bụi mịn (PM2.5/PM10) và chỉ số UV theo thời gian thực, tiêu thụ năng lượng thấp, sử dụng công nghệ Internet vạn vật băng hẹp (LoRa kết hợp NB-IoT) tại Khu Công nghệ cao và được hiển thị trên giao diện web. Hệ được thiết kế để chạy trên Raspberry Pi, sử dụng ngôn ngữ Python để xử lý dữ liệu nhận từ vi điều khiển STM32 thông qua giao thức truyền sóng Lora, dữ liệu sau khi thu thập sẽ được xử lý và gửi đến một máy chủ MQTT (broker) thông qua sóng băng tần hẹp NB-IoT để phục vụ mục đích giám sát từ xa, từ đó tiến hành phát triển hệ thống phần mềm và ứng dụng hiển thị dữ liệu các thông số đo theo thời gian thực.

Từ khóa: *Mô-đun Internet vạn vật băng tần hẹp; Mạng diện rộng công suất thấp; Hệ thống quan trắc môi trường; Công nghệ truyền thông tầm xa; Vi điều khiển STM32.*

ABSTRACT

Air pollution and ultraviolet (UV) radiation are becoming increasingly serious threats to public health and the environment, especially in densely populated urban areas. This study presents the design and implementation of a real-time, low-power monitoring system for fine particulate matter (PM2.5/PM10) and UV index using Narrowband Internet of Things (NB-IoT) technology at the High-Tech Park. The system is designed to operate on a Raspberry Pi platform and utilizes Python to process data received from an STM32 microcontroller via the LoRa wireless communication protocol. After data acquisition, the information is processed and transmitted to an MQTT broker using NB-IoT communication, enabling remote monitoring. The system also includes the development of supporting software and a real-time data visualization application for end-users.

Keywords: *NB-IOT (Narrowband Internet of Things); LPWAN; Environmental Monitoring* system; LORAWAN; MCU STM32.

1. TỔNG QUAN

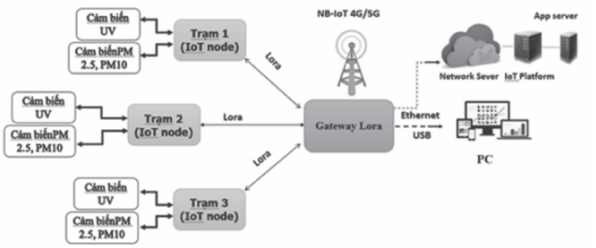
Trong những năm gần đây, nhu cầu giám sát môi trường theo thời gian thực ngày càng tăng cao, đặc biệt trong bối cảnh ô nhiễm không khí và bức xạ tử ngoại (UV) ngày càng ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe cộng đồng. Việc xây dựng các hệ thống quan trắc sử dụng công nghệ Internet vạn vật (IoT) không những giúp cải thiện khả năng cảnh báo sớm mà còn hỗ trợ quá trình ra quyết định trong quản lý đô thị và quy hoạch môi trường.

Trong số các công nghệ truyền thông IoT hiện nay, NB-IoT (Narrowband Internet of Things) nổi lên như một giải pháp lý tưởng cho các ứng dụng yêu cầu truyền dữ liệu tầm xa, tiêu thụ năng lượng thấp và độ tin cậy cao. NB-IoT là một công nghệ LPWAN (Low Power Wide Area Network) được tiêu chuẩn hóa bởi tổ chức 3GPP, hoạt động trên nền hạ tầng mạng di động hiện có (LTE/GSM), cho phép các thiết bị IoT hoạt động với thời gian sử dụng pin lên đến 10 năm và vùng phủ sóng rộng hơn so với các chuẩn truyền thống như Wi-Fi hay Zigbee [1]. Một ưu điểm nổi bật của NB-IoT là khả năng hỗ trợ hàng chục nghìn thiết bị trong cùng một khu vực phủ sóng, rất phù hợp với các hệ thống giám sát phân tán như cảm biến bụi mịn (PM2.5/PM10), cảm biến UV, cảm biến chất lượng đất hoặc nước. Việc kết hợp NB-IoT với các giao thức truyền thông nhẹ như MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) giúp tối ưu hóa băng thông và giảm thiểu độ trễ truyền thông trong các ứng dụng giám sát từ xa [2]. Song song với đó, giao thức LoRa (Long Range) cũng được sử dụng rộng rãi trong việc thu thập dữ liệu ở tầng cảm biến nhờ đặc tính tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp với các thiết bị chạy bằng pin đặt ở nơi khó tiếp cận. Việc sử dụng vi điều khiển STM32 để xử lý tín hiệu từ cảm biến, kết hợp với nền tảng vi máy tính Raspberry Pi làm trung tâm điều phối và xử lý dữ liệu cục bộ, đang là mô hình được triển khai nhiều trong các hệ thống IoT hiện đại [3].

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất một hệ thống giám sát bụi mịn và chỉ số UV theo thời gian thực, áp dụng công nghệ NB-IoT để truyền dữ liệu về máy chủ trung tâm thông qua giao thức MQTT. Dữ liệu được thu thập từ các cảm biến được truyền lên Raspberry Pi bằng giao thức LoRa, xử lý và hiển thị trên phần mềm theo thời gian thực [4]. Hệ thống được xây dựng hướng đến mục tiêu tiết kiệm năng lượng, chi phí thấp và dễ mở rộng, phù hợp cho triển khai tại các khu công nghệ cao, khu công nghiệp hoặc khu đô thị thông minh.

2. NỘI DUNG THỰC HIỆN

Với quy mô thử nghiệm của nghiên cứu này, nhóm đã tiến hành khảo sát vị trí lắp đặt, bố trí triển khai xây dựng hệ thống; lựa chọn thiết bị phù hợp đạt chuẩn để thi công; xác định vị trí lắp đặt tại 3 vị trí trong Khu Công nghệ cao, các trạm cách nhau trong phạm vi bán kính 3km.



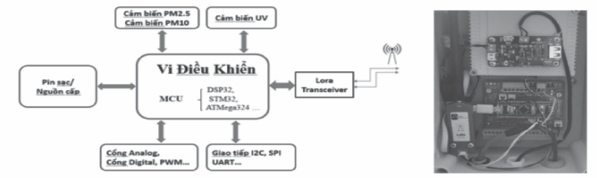
Hình 1. Mô hình kết nối, hoạt động của hệ thống

2.1. Tích hợp module Lora cho các trạm và phát triển phần mềm giao thức mạng cho phép truyền dữ liệu thông suốt đến máy chủ dữ liệu thông qua NB-IoT Gateway

Công nghệ LoRa với ưu điểm về tầm phủ sóng xa, tiêu thụ năng lượng thấp và khả ☞

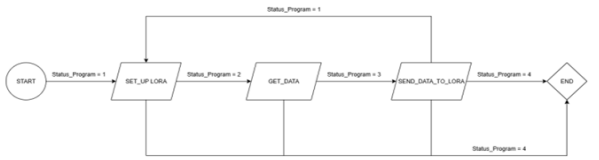
năng hoạt động ổn định trong môi trường đô thị phức tạp cho thấy tiềm năng lớn trong việc triển khai các trạm giám sát môi trường quy mô rộng. Bên cạnh đó, việc phát triển Gateway NB-IoT thế hệ mới tích hợp module LoRa đã góp phần tạo nên một kiến trúc mạng thông suốt, cho phép dữ liệu từ các trạm cảm biến được truyền tải nhanh chóng và ổn định về máy chủ dữ liệu, qua đó hỗ trợ hiệu quả cho công tác giám sát, phân tích và đưa ra các cảnh báo kịp thời.

Từ mô hình kết nối 3 trạm và bộ truyền nhận Gateway LoRa NB-IOT 4G, nhóm nghiên cứu xây dựng sơ đồ nguyên lý trạm (IoT node) như hình 2. Trạm IoT Node thiết kế bao gồm MCU chính là STM32 chạy tiết kiệm điện năng, nhưng vẫn đáp ứng được thu thập và truyền dẫn. Chuẩn truyền dữ liệu được chọn ở đây là Lora. Vi điều khiển sẽ có các kết nối cơ bản để kết nối các loại cảm biến và dữ liệu đầu vào cơ bản: UART, I2C, SPI, I/O, CAN BUS, PWM, ADC, và USB.



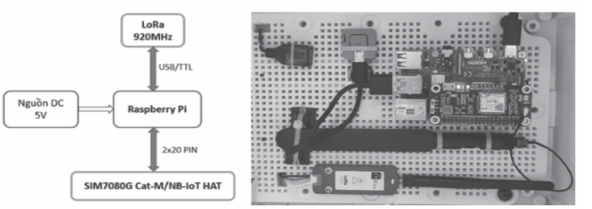
Hình 2. Sơ đồ nguyên lý IoT node

Chương trình trên STM32 được thiết kế dựa trên mô hình Finite State Machine (FSM) như sơ đồ dưới đây:



Hệ thống tập trung thu thập dữ liệu từ các cảm biến UV, bụi mịn (PM2.5/PM10) và $V_{Battery}$, sử dụng kiến trúc software timer 100ms dựa trên hardware timer STM32 để cân bằng giữa hiệu suất và tiết kiệm năng lượng. Về kiến trúc timer, chúng tôi áp dụng mô hình software timer dựa trên hardware timer của STM32. Tần số clock đầu vào là 8MHz, được chia bởi prescaler = 7999 và Auto-Reload Register (ARR) = 99, dẫn đến tần số interrupt thực tế là 10Hz – tương đương với chu kỳ 100ms cho mỗi tick. Dữ liệu sau xử lý được truyền qua giao thức LoRa đến gateway, đảm bảo kết nối ổn định và tiêu thụ điện thấp trong môi trường IoT [5], [6].

Thiết kế sử dụng mô hình FSM giúp quản lý trạng thái rõ ràng, tăng độ tin cậy, dễ mở rộng và hỗ trợ chế độ tiết kiệm năng lượng của vi điều khiển. Giao thức LoRa mang lại hiệu suất truyền xa, chống nhiễu tốt và phù hợp với các ứng dụng giám sát môi trường hoặc nông nghiệp [7]. Hệ thống có chi phí thấp, linh hoạt cao, dễ triển khai trên quy mô lớn nhờ nền tảng STM32 giá rẻ phù hợp khi mở rộng ra đối với nhiều trạm.



Hình 3. Sơ đồ Gateway tích hợp NB-IoT

Trên Raspberry Pi – trung tâm xử lý của IoT Gateway – chương trình sử dụng ngôn ngữ Python để giao tiếp với module NB-IoT (SIM7080) và đồng bộ dữ liệu nhận từ LoRa qua UART (AtomLite ESP32). NB-IoT dùng mạng Viettel đảm bảo phủ sóng mạnh, cho phép reset kết nối khi mạng không ổn định.

Kiến trúc chương trình sử dụng đa luồng (thread) [8], mỗi luồng có hàng đợi riêng để xử lý dữ liệu từ LoRa và chuyển tiếp qua NB-IoT bằng giao thức MQTT [9] lên CoreIoT, thay vì

gửi trực tiếp đến backend để tránh tiêu tốn tài nguyên do NB-IoT có băng thông thấp. Dữ liệu được gửi định kỳ mỗi 5 phút, với hàng đợi vừa đủ để chống tràn và cơ chế dự phòng khi gặp lỗi mạng, đảm bảo tính ổn định và đáng tin cậy cho hệ thống trong điều kiện IoT thực tế.

***Tự động hóa tác vụ với Shell Script:**

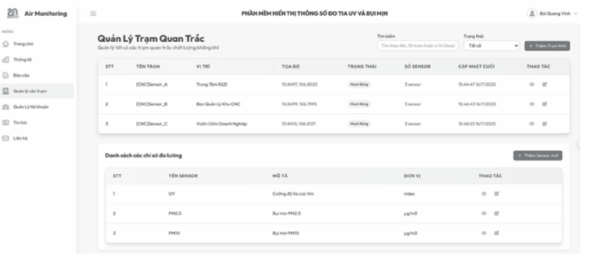
Chương trình run.sh được thiết kế để tự động kiểm tra và cài đặt các môi trường cần thiết, tạo môi trường ảo và khởi động ứng dụng một cách ổn định, giúp giảm lỗi do môi trường không đồng nhất và dễ triển khai trên nhiều thiết bị Raspberry Pi.

Để đảm bảo kết nối NB-IoT luôn sẵn sàng, script tích hợp cơ chế giám sát định kỳ 30 phút/lần. Khi phát hiện sự cố kết nối, hệ thống sẽ tự động ngắt MQTT, chờ và thử kết nối lại, đồng thời reset module. Nếu lỗi kéo dài quá 3 lần thử, chương trình sẽ ngắt hoàn toàn để bảo vệ dữ liệu và thiết bị. Thiết kế này tối ưu hiệu suất và tăng độ bền trong môi trường IoT không ổn định.

2.2. Hiển thị dữ liệu thông số đo được lên web/app

Web/app hoạt động theo nguyên lý thu thập, xử lý và hiển thị dữ liệu thời gian thực từ các trạm quan trắc, hệ thống tự động thu nhận các chỉ số UV, PM2.5 và PM10, truyền về trung tâm qua giao thức bảo mật và ổn định. Dữ liệu được xử lý để lọc nhiễu, chuẩn hóa và tính toán theo tiêu chuẩn, sau đó hiển thị qua giao diện component-based tối ưu theo thời gian thực, giúp người dùng dễ dàng theo dõi xu hướng và đánh giá chất lượng thông tin đo được.

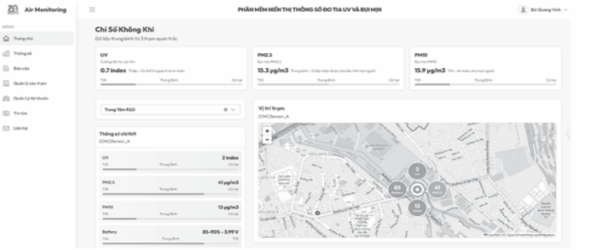
Hệ thống cảnh báo khi phát hiện chỉ số vượt ngưỡng an toàn và hỗ trợ nhiều kênh thông báo. Nhằm đảm bảo tính liên tục và ổn định, phần mềm tích hợp cơ chế tự phục hồi, ghi log lỗi và có kiến trúc phân tán dễ mở rộng thêm trạm mới mà không ảnh hưởng hiệu suất tổng thể.



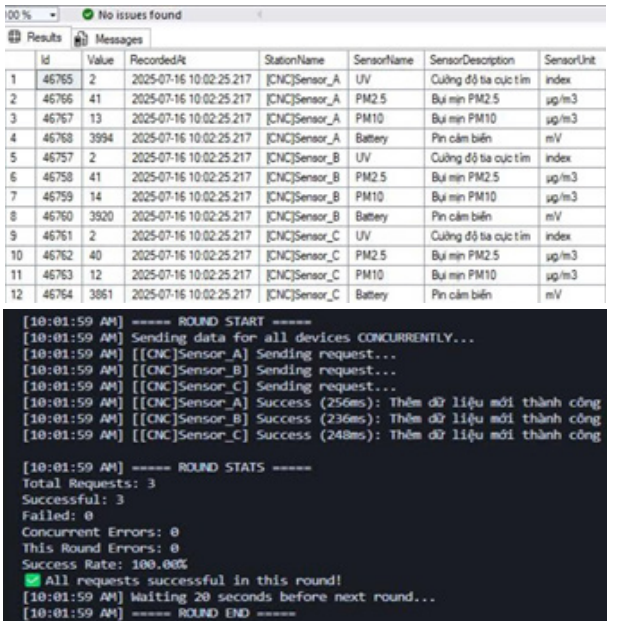
Hình 4. Giao diện tác vụ quản lý thông tin các trạm quan trắc

3. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Việc lựa chọn công nghệ mạng cảm biến không dây phù hợp phụ thuộc vào nhiều yếu tố như phạm vi triển khai, yêu cầu về năng lượng, chi phí, độ tin cậy và tốc độ truyền dữ liệu. Trong các ứng dụng giám sát môi trường, các công nghệ như IEEE 802.15.4 và LoRa/LoRaWAN thường được ưu tiên nhờ khả năng tiết kiệm năng lượng và phạm vi phủ sóng linh hoạt. Tuy nhiên, trong các tình huống yêu cầu tốc độ cao hoặc truyền dữ liệu từ xa, 3G/4G và WiFi vẫn là lựa chọn khả thi. Việc kết hợp nhiều công nghệ trong cùng một hệ thống (Mạng cảm biến không dây thông suốt) là xu hướng phát triển trong tương lai nhằm tối ưu hóa hiệu suất (tốc độ dữ liệu) và độ tin cậy (khoảng cách truyền sóng, vùng phủ sóng) của hệ thống giám sát môi trường.



Hình 5. Giao diện hiển thị thông số các trạm quan trắc



	Id	Value	RecordedAt	StationName	SensorName	SensorDescription	SensorUnit
1	46765	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	UV	Cường độ tia cực tím	index
2	46766	41	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
3	46767	13	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
4	46768	3994	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_A	Battery	Pin cảm biến	mV
5	46757	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	UV	Cường độ tia cực tím	index
6	46758	41	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
7	46759	14	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
8	46760	3920	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_B	Battery	Pin cảm biến	mV
9	46761	2	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	UV	Cường độ tia cực tím	index
10	46762	40	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	PM2.5	Bụi mịn PM2.5	µg/m3
11	46763	12	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	PM10	Bụi mịn PM10	µg/m3
12	46764	3861	2025-07-16 10:02:25.217	[CNC]Sensor_C	Battery	Pin cảm biến	mV

Hình 6. Kết quả dữ liệu từ hệ thống

Các giá trị đo của cảm biến được cập nhật hoạt động liên tục và ổn định, mỗi chu kỳ đều có đủ 4 loại dữ liệu, điều này cho thấy hệ thống đã tối ưu hóa đồng bộ thu thập các dữ liệu, các trạm hoạt động song song, không bị xung đột hoặc thiếu dữ liệu.

Thông qua quá trình nghiên cứu và đánh giá, việc ứng dụng công nghệ mạng cảm biến không dây hiện đại, đặc biệt là công nghệ LoRa thế hệ mới kết hợp với Gateway NB-IoT trên nền tảng mạng 4G/5G, là một hướng đi khả thi và hiệu quả trong xây dựng hệ thống IoT phục vụ giám sát môi trường tại Khu Công nghệ cao Thành phố Hồ Chí Minh.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và triển khai thành công một hệ thống giám sát môi trường tích hợp các cảm biến đo bụi mịn (PM2.5, PM10) và chỉ số bức xạ tử ngoại (UV) sử dụng sự kết hợp giữa công nghệ LoRa và NB-IoT. Hệ thống được xây dựng với kiến trúc phần cứng dựa trên vi điều khiển STM32, nền tảng Raspberry Pi và gateway tích hợp, đồng thời ứng dụng giao thức truyền thông MQTT để đảm bảo việc thu thập, xử lý và truyền tải dữ liệu ổn định theo thời gian thực. Kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, duy trì kết nối liên tục và cung cấp dữ liệu đo đáng tin cậy, đồng bộ từ nhiều trạm quan trắc trong phạm vi triển khai.

Điểm mạnh nổi bật của nghiên cứu là sự kết hợp giữa hai công nghệ truyền thông hiện đại: LoRa với ưu thế truyền xa, tiêu thụ năng lượng thấp, phù hợp cho các nút cảm biến phân tán; và NB-IoT với khả năng phủ sóng rộng, băng thông ổn định, thích hợp cho truyền dữ liệu tập trung về máy chủ. Sự tích hợp này không chỉ tăng tính linh hoạt và khả năng mở rộng mà còn giảm thiểu chi phí vận hành, hứa hẹn áp dụng hiệu quả trong các khu công nghệ cao, khu công nghiệp và các đô thị thông minh. Ngoài ra, việc phát triển giao diện web/app hiển thị dữ liệu trực quan theo thời gian thực giúp nâng cao tính ứng dụng, hỗ trợ người dân và cơ quan quản lý trong việc theo dõi và đưa ra quyết định kịp thời.

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng mở ra những hướng phát triển tiếp theo, bao gồm: mở rộng quy mô thử nghiệm ở các khu vực đô thị có mật độ dân cư cao, đánh giá độ chính xác của cảm biến theo chuẩn quốc tế, đồng thời phân tích hiệu quả kinh tế so với các hệ thống quan trắc truyền thống. Với những cải tiến này, hệ thống có thể trở thành một giải pháp công nghệ bền vững, góp phần nâng cao chất lượng giám sát môi trường và hỗ trợ các chính sách quản lý đô thị hiện đại trong tương lai.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Hứa Nguyễn Đăng Thy;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Vũ Ngọc Long, Trần Thanh Hải, Trần Chấn Quốc, Bùi Quang Vinh.

Lời cảm ơn:

Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH theo Hợp đồng Số: 97/2024/HĐ-QKHCN.❖

Ngày nhận bài: **06/8/2025**
Ngày phản biện: **21/8/2025**

Tài liệu tham khảo:

[1]. Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2016), "*Overview of LTE enhancements for cellular IoT*". In IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), pp. 1-5.

[2]. Banks, A., & Gupta, R. (2014), "*MQTT Version 3.1.1*". OASIS Standard.

[3]. Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, "*A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of Things"*, W. M. (2016), Sensors, 16(9), 1466.

[4]. Zhenxin Wang, Zhi Deng, Ke Xu, Ping Zhang & Tao Liu, "*Based on Internet of Things Platform Using NB-IoT Communication Low-Power Weather Station System*". 13 July 2022, International Conference on Wireless Communications, Networking and Applications, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_65

[5]. H. Kumarage, S. Ilayperuma, M. Calcuttawala, H. Jayathilaka, and U. Nawinne, "*LoRa Sensor Node Implementation for IoT Applications*". In: Proc. of IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIINFS.2017.8300384

[6]. R. Li, B. Li, Z. Yang, and R. Yu, "*A LoRa-based Low-Power Wide-Area Network Gateway for Industrial IoT*". In: Proc. of 13th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Hong Kong, 2017, pp. 497-501. DOI: 10.1109/CIS.2017.00114

[7]. Vanessa Alvear-Puertas, Paul D. Rosero-Montalvo, Jaime R. Michilena-Calderón, Ricardo P. Arciniega-Rocha & Vanessa C. Erazo-Chamorro, "*Urban Air Pollution Monitoring by Neural Networks and Wireless Sensor Networks Based on LoRa*". 01 November 2020, Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2020, Volume 2, Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63089-8_59

[8]. Ehis, A. T, "*Analysis of Multi Threading and Cache Memory Latency in Multithreaded Architecture*". Brazilian Journal of Science, Vol. 3 No. 1, 2024. https://doi.org/10.14295/bjs.v3i1.458

[9]. Ahmed Samy Moursi, Nawal El-Fishawy, Soufiene Djahel & Marwa Ahmed Shouman, "*An IoT enabled system for enhanced air quality monitoring and prediction on the edge*". Complex & Intelligent Systems, Volume 7, pages 2923-2947, 2021, Springer nature Link. DOI: https://doi.org/10.1007/s40747-021-00476-w

[10].Google map: Sensor Nodes Location (google.com).