

Smart Street Light based on Fog Computing for Smarter Cities

Firstname Lastname ^{1,†,‡} , Firstname Lastname ^{1,‡} and Firstname Lastname ^{2,*}

¹ Affiliation 1; e-mail@e-mail.com

² Affiliation 2; e-mail@e-mail.com

* Correspondence: e-mail@e-mail.com; Tel.: (optional; include country code; if there are multiple corresponding authors, add author initials) +xx-xxxx-xxx-xxxx (F.L.)

† Current address: Affiliation 3

‡ These authors contributed equally to this work.

Abstract: A single paragraph of about 200 words maximum. For research articles, abstracts should give a pertinent overview of the work. We strongly encourage authors to use the following style of structured abstracts, but without headings: (1) Background: place the question addressed in a broad context and highlight the purpose of the study; (2) Methods: describe briefly the main methods or treatments applied; (3) Results: summarize the article's main findings; (4) Conclusion: indicate the main conclusions or interpretations. The abstract should be an objective representation of the article, it must not contain results which are not presented and substantiated in the main text and should not exaggerate the main conclusions.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3 (List three to ten pertinent keywords specific to the article; yet reasonably common within the subject discipline.)

1. Introduction

Các hệ thống đèn đường là một phần không thể thiếu trong việc đảm bảo chiếu sáng vào ban đêm ở bất cứ đâu. Vai trò chiếu sáng của đèn đường vào ban đêm mạng lại sự an toàn, làm hạn chế những nguy hiểm trên đường như trộm, cướp, tai nạn giao thông. Tuy nhiên, việc chiếu sáng này chiếm đến 19% năng lượng sử dụng toàn cầu và dẫn đến 6% ô nhiễm môi trường liên quan đến khí thải nhà kính [1]. Các loại đèn đường hiện nay đều thiếu các đặc tính thông minh gây tiêu tốn nhiều năng lượng, đòi hỏi phải liên tục bảo trì, gây khó khăn trong việc quản lý và điều khiển. Những năm gần đây, các nghiên cứu về xây dựng hệ thống đèn đường thông minh đang nhận được nhiều sự quan tâm, nghiên cứu cũng đạt được nhiều thành quả và đang trở thành một trong những xu hướng phát triển của thành phố thông minh.

Hệ thống đèn đường thông minh cơ bản hoạt động dựa trên việc phân tích dữ liệu thu nhận được từ các cảm biến gắn trên cột đèn, các loại cảm biến ở đây có thể là cảm biến chuyển động hoặc cảm biến ánh sáng, từ các thông tin này, đèn đường có thể tự tạo ra các hiệu lệnh như tắt/bật hoặc thay đổi cường độ ánh sáng. Một số hệ thống hiện đại hơn, còn có sử dụng thêm hệ thống quản lý thông tin tập trung, hỗ trợ việc giám sát và điều khiển từ xa. Hầu hết các nghiên cứu về hệ thống đèn thông minh hiện tại còn nhiều hạn chế, chưa đem lại hiệu quả tối đa về năng lượng, chi phí vận hành, bảo trì và chưa tương xứng với sự phát triển của các công nghệ IoT, ICT và trí tuệ nhân tạo.

Hiện nay, có nhiều nghiên cứu và sản phẩm đèn đường sử dụng năng lượng tái tạo, cụ thể là năng lượng mặt trời [2–4]. Hiệu quả về vấn đề tiết kiệm năng lượng, giảm tác động đến với môi trường cũng như tính di động và khả năng hoạt động độc lập là điều không thể bàn cãi. Tuy nhiên, hệ thống đèn năng lượng mặt trời đơn thuần còn nhiều hạn chế và khó có thể triển khai trên diện rộng. Bởi vì, để có thể duy trì hoạt động đảm bảo an toàn chiếu sáng suốt đêm một cột đèn cần có một tấm pin năng lượng và pin lưu trữ đủ lớn điều này yêu cầu chi phí đầu tư toàn hệ thống rất lớn, sử dụng đơn thuần như thế này chưa hiệu quả về chi phí và tối ưu về năng lượng.

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.; Lastname, F. Title. *Journal Not Specified* **2021**, *1*, 0. <https://doi.org/>

Received:

Accepted:

Published:

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Submitted to *Journal Not Specified* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất xây dựng hệ thống đèn đường thông minh dựa các trên thuật toán trí tuệ nhân tạo. Hệ thống được trang bị đèn năng lượng mặt trời cùng với các loại cảm biến, sử dụng mạng cảm biến không dây để giao tiếp giữa thiết bị và trung tâm điều khiển, hệ thống webserver quản trị tập trung và đặc biệt là các thuật toán Machine Learning và Deep Learning điều phối hoạt động. Điểm nổi bật của hệ thống là khả năng giảm thiểu năng lượng tiêu thụ bằng cách tự động điều chỉnh độ sáng một cách thích ứng với các điều kiện xung quanh. Cụ thể sử dụng lần lượt các thuật toán Deep Learning để dự đoán năng lượng bức xạ mặt trời và năng lượng mà tấm pin năng lượng mặt trời thu được. Bên cạnh đó, là thuật toán toán dự đoán lưu lượng giao thông. Từ thông tin mức năng lượng lưu trữ hiện tại và lưu lượng giao thông của từng khu vực mà hệ thống có thể đưa ra lịch trình hoạt động cụ thể. Bên cạnh đó, hệ thống còn có khả năng tự động phát hiện lỗi (đèn hỏng ...) và giám sát quá trình hoạt động của đèn.

2. Related Works

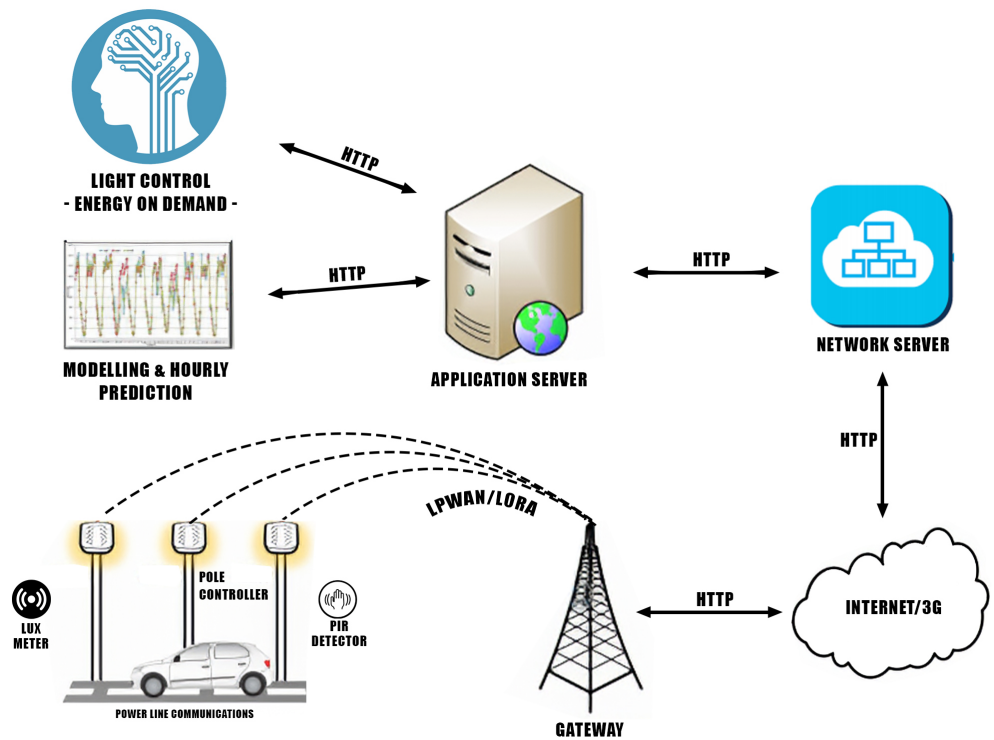
Trong những năm gần đây, đã có rất nhiều nghiên cứu về việc xây dựng một hệ thống đèn đường thông minh ứng dụng trong thành phố thông minh từ đơn giản đến phức tạp. Những nghiên cứu xoay quanh đề tài có kể đến như hoạt động dựa vào các cảm biến, khoảng cách truyền tải, thông tin thời tiết, lưu lượng giao thông, có khả năng hoạt động độc lập và quản lý từ xa ... Từ những yếu tố kê trên, chúng tôi sẽ tiến hành đi tìm hiểu và phân tích cũng như đánh giá những hệ thống hiện có khi đem so sánh với hệ thống của chúng tôi.

Sindhu A.M đã có những nghiên cứu về việc sử dụng cảm biến hồng ngoại (Infrared Sensor) cùng với đèn LED (Light Emitting Diode) để xây dựng hệ thống đèn thông minh, hoạt động dựa vào chuyển động để điều khiển bật tắt đèn [5]. Việc sử dụng IR gặp hạn chế về phạm vi hoạt động thấp. Tiếp theo nhóm tác giả trong bài báo này [6] đã đề xuất sử dụng Global System for Mobile (GSM) dùng để gửi quản lý và điều khiển đèn từ xa. Bên cạnh đó, nhóm tác giả trong bài. [7] đã tiếp cận theo hướng sử dụng kết nối có dây từ pole tới gateway để xây dựng hệ thống đèn có khả năng tiết kiệm năng lượng, tự động phát hiện lỗi cũng như khả năng quản lý từ xa. Để giải quyết về vấn đề truyền tải cũng như đáp ứng được yêu cầu về việc sử dụng tiết kiệm năng lượng cũng như giá thành rẻ, phần lớn các nghiên cứu đều tập trung sử dụng wireless sensor networks (WSN) trong việc truyền tải thông tin. Một số dạng của WSN có thể kể đến như ZigBee, Sigfox, LoRa, phù hợp dùng để giao tiếp với thiết bị đèn. Bài báo [8] là một trong những nghiên cứu có sử dụng ZigBee để làm công nghệ truyền tải để có thể điều chỉnh hoạt động của đèn dựa vào cảm biến ánh sáng cũng như cảm biến chuyển động. Một trong những nghiên cứu khác có sử dụng ZigBee được đề cập trong bài này [9] không chỉ cho thấy sự hiệu quả trong việc truyền tải mà còn có khả năng tiết kiệm năng lượng của thiết bị. Trong bài [1], ý tưởng về một hệ thống đèn đường thông minh và tiết kiệm năng lượng đã được trình bày trong bài báo này, kết quả thu được từ thực nghiệm cho thấy được năng lượng tiết kiệm rơi vào khoảng 68% - 82% tùy thuộc vào mùa trong năm. Vấn đề về thông tin thời tiết cũng đã được đề cập trong bài báo này [10], Philip Tobianto Daely cùng với đồng nghiệp của anh ấy đã tích hợp các dữ liệu về thời tiết vào trong hệ thống đèn cũng như sử dụng ZigBee trong việc truyền tải kết nối và xây dựng hệ thống web-based management dùng cho việc quản lý. Cải tiến hơn nữa, chúng ta có nghiên cứu về việc áp dụng việc dự đoán lưu lượng giao thông vào trong hệ thống đèn thông minh được trình bày trong bài báo này [11], hệ thống sử dụng camera dùng để quan sát đánh giá từ đó có thể đưa ra điều chỉnh độ sáng của đèn phụ thuộc vào lưu lượng phương tiện tham gia giao thông. Kết quả từ bài báo này [12], cho thấy khả năng tiết kiệm năng lượng cũng như khả năng hoạt động trên thời gian thực đã được kiểm chứng thực tế của hệ thống đèn có sử dụng việc dự đoán lưu lượng giao thông trong việc điều khiển độ sáng của đèn. Ngoài ra còn có những nghiên cứu khác tập trung sử dụng công nghệ LoRa để có thể truyền tải trong phạm vi rộng lớn được trình bày trong những bài báo sau [13]. Bài báo trên đưa ra hai thử nghiệm trong việc sử dụng IEEE 802.15.4 và LoRa để xây dựng hệ thống đèn đường thông minh.

91 Từ kết quả của những nghiên cứu đã tìm hiểu được, trong đề xuất xây dựng hệ
 92 thống của chúng tôi quyết định sử dụng công nghệ LoRa trong việc truyền tải dữ liệu
 93 đồng thời sử dụng các cảm biến để thu thập thông tin trạng thái của các thiết bị đèn,
 94 cũng như kết hợp với các thuật toán dự báo và các tác động của môi trường xung quanh
 95 để đưa ra lịch trình hoạt động của đèn một cách tối ưu nhất. Cuối cùng là xây dựng hệ
 96 thống web quản lý điều khiển từ xa. Giải thích chi tiết về hệ thống đề xuất của chúng tôi
 97 sẽ được trình bày ở Section III.o

98 3. The proposed system

99 3.1. System architecture



Hình 1. System architecture

100 We proposed a smart street light architecture as illustrated in Fig. 1. The pro-
 101 posed system consists of a decentralized infrastructure system and data communication
 102 methods. The system's main components are as follows:

- 103 • Node controller: Includes a microprocessor and sensors for controlling the lamp's
 104 operation and communicating with the server.
- 105 • Edge controller: It's a processing intermediary that acts as a LoRaWAN gateway, in
 106 charge of the connection between Node controller and Cloud controller.
- 107 • Cloud controller: It is a web-based management system.

108 In our proposed context, many street light clusters will be installed in various areas,
 109 each of which will be responsible for lighting a route or a part of the route. In each
 110 cluster, there is a gateway and many light poles with integrated Node controller inside
 111 to control the operation and communicate with the server. Each light pole in that cluster
 112 communicates with the Application Server via the Gateway and Network server as an
 113 intermediary. In particular, the LoRaWAN protocol is used to send and receive data from
 114 long-distance light poles concentrated at Gateway. The LoRaWAN Gateway will then
 115 forward this data to the Network server using the TCP/IP protocol suite. The Network
 116 Server is the final bridge to transfer these messages to the Application Server, with the
 117 function of managing the network, ensuring secure transmission, and controlling data.

118 If the data is the lamp's operation measurement (such as the lamp's state on/off, current
119 energy, obtained sensor brightness, etc.), it will be stored in the database and displayed
120 on the web administration interface. Through that, the administrator can monitor the
121 operation as well as issue control commands to a specific light. Besides, if the server
122 receives a request to provide a lamp operating schedule. Deep Learning algorithms will
123 be coordinated to execute in order to schedule operations sent to the respective devices.

124 3.1.1. Communication

125 According to the system architecture described above, all street lights communicate
126 with the edge controller via LoRaWAN. LoRaWAN is a low power wide area network
127 (LPWAN) protocol developed by the LoRa Alliance. LPWAN is a wireless communication
128 protocol for wide area networks. LPWAN is a technology designed for IoT applications
129 that provides a long data transmission range, low power consumption, and a low-cost
130 deployment solution. [14].

131 LoRaWAN is one of the leading technologies of LPWAN. LoRaWAN provides 6
132 spreading factors (SF7 - SF12) with different data transfer rates. SFs have a trade-off
133 between data rate and transmission range, the larger the SF the greater the transmission
134 range and the lower the speed, and vice versa [15]. The data rate of this protocol ranges
135 from 0.3 kbps to 50 kbps, with each packet having a maximum payload length of 243
136 bytes [16]. When using LoRaWAN, packets sent by end devices are received by gateways
137 in the same range. A single LoRaWAN gate can cover a range of up to 10 km and
138 accommodate thousands of devices.

139 Data transferred via LoRaWAN from node controller to edge controller includes
140 values such as ambient brightness, currently stored energy, and lamp status. In the other
141 way, data transmitted from the edge controller to the node controller includes control
142 command to turn on/off the lights as well as a schedule for light operation. The TCP/IP
143 protocol is used to communicate between the Edge controller and the Cloud controller.
144 The data transmitted from edge to cloud using this protocol is the data received by the
145 Edge controller from the Node controller. The information sent to the edge controller is
146 the command to activate the operating mode, such as automatic or manual, is sent to
147 the edge controller. When the signal is received in automatic mode, the edge controller
148 determines the corresponding schedule and brightness based on the predictive model.
149 In some special context, when the administrator requires immediate adjustment, these
150 commands, which include the on/off light state as well as the brightness operation, are
151 sent to the edge. The edge controller will receive it and forward it to the Node controller
152 for execution.

153 3.1.2. Node controller

154 Node controller is placed on each lamp post, which includes the STM32 micro-
155 controller and sensors such as a light sensor to measure ambient brightness for the
156 purpose of activating the lamp's operation mode when it's dark and assisting with fault
157 detection. The motion detection sensor (PIR detector) is located in the light cluster's
158 nearest light pole. This sensor will detect the movement of people and vehicles as they
159 pass through the designated area. These motion detection signals will be sent to the
160 edge to create a data set for the model to predict traffic flow. It also controls the lamp
161 operation when the system enters energy-saving mode. The last, digital potentiometers
162 (Digital Potentiometers) are used to adjust the brightness of the lamp. This device will
163 be directly connected to the lamp in order to adjust its operation. The node controller,
164 in particular, is in charge of turning the lights on/off and adjusting the brightness of
165 the lights based on the command transferred from the edge controller. Furthermore,
166 the node controller sends the lamp's operating parameters, such as the device's current
167 power level, light intensity, and lamp on/off status.

168 3.1.3. Edge controller

169 The edge controller acts as a processing intermediary between the node and the
 170 cloud. The hardware-based Edge controller is a Raspberry Pi 4 embedded computer with
 171 an integrated LoRa module. After installing the necessary hardware and software, this
 172 device can be regarded as a LoRaWAN connection gateway with two network interfaces
 173 that serves as a communication bridge between the LoRa wireless network and the IP
 174 network via WiFi, Ethernet, 3G or 4G mobile networks. Furthermore, because of the
 175 nature of an embedded computer, this is also a place for the inference of machine learning
 176 models, deep learning, and processing algorithms to generate control commands that
 177 are sent to each node. With this approach, it is possible to take advantage of the power
 178 of edge computing, particularly in the problem of reducing latency due to long-distance
 179 transmission, reducing congestion, and bottlenecks when thousands of nodes do not
 180 have to connect to a central server at the same time.

181 3.1.4. Cloud controller

182 The endpoint in this smart streetlight system is the cloud controller, which is
 183 a centralized management server that collects data from all edges and nodes. These
 184 data are recorded, analyzed, and visualized. The goal is to evaluate and monitor the
 185 operational status of each area, and to quickly change management plans and methods
 186 to suit each area. Furthermore, the collected data is used not only for monitoring and
 187 supervision, but also to build a warning mechanism. When there is an error or abnormal
 188 operation of the device, the system will immediately send an alert to the administrator
 189 and technical staff for timely handling in order to avoid the lamp's operation being
 190 interrupted. More importantly, this data is used to update the retraining of the models,
 191 allowing the model to more intelligently adapt to the environmental conditions in which
 192 the lamps are installed. This system has two control modes: manual and automatic. By
 193 default, the system will operate in automatic mode. That is, the edge controller will
 194 directly schedule the lamp operation based on the data and requirements of the node
 195 controller. Besides this, the system provides a mechanism for administrators to manually
 196 set up a specific schedule for each area via the Web application interface.

197 3.2. *Intelligent Sensing street lamp*

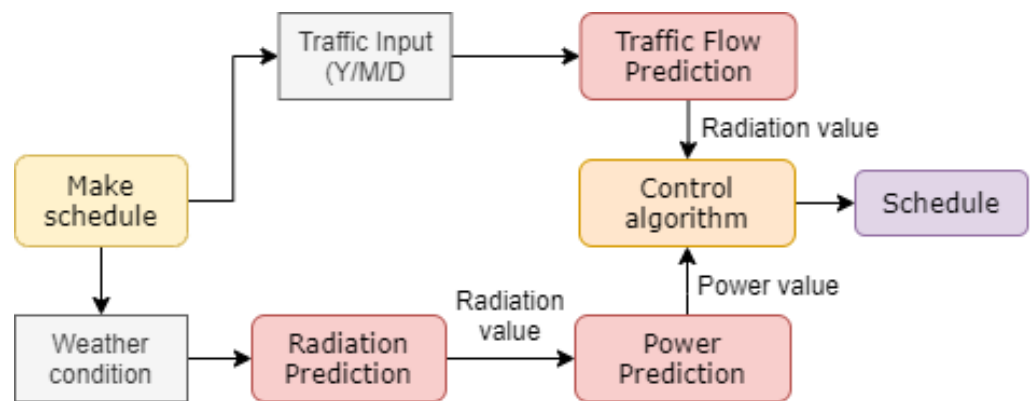
198 Aside from providing a platform and a management technique, the smart street
 199 light system that we propose has a major requirement that is energy saving. As a result
 200 of this need, the system powers the lights with solar energy. However, normal solar
 201 lights on the market can hardly guarantee the lighting for a long time throughout the
 202 night; if the lights meet that condition, the equipment cost must increase. The use of
 203 solar panels and larger storage batteries is not a viable solution, due to the investment
 204 costs and environmental impact after those devices reach the end of their useful life.
 205 Therefore, combining a hardware optimization solar light system with an algorithm to
 206 adjust the lamp's operation is an effective solution for both energy and cost savings as
 207 well as reducing the impact on the environment.

208 The proposed system provides an intelligent mechanism to adjust the brightness
 209 adaptively with environmental conditions (weather, traffic) to optimize energy con-
 210 sumption. This mechanism combines the operation of sensors such as light intensity
 211 sensors, motion detection sensors, boards, and artificial intelligence algorithms. Further-
 212 more, the system's goal is to ensure that the lighting system has enough energy to run
 213 continuously, regardless of weather conditions. The solution to this problem is to use
 214 an AI model to predict power and traffic flow; this information is used to adjust light
 215 operations adaptively. We do not only predict these values for the next day, but also for
 216 the next n days (with n is the number of days that the administrator wants the system to
 217 maintain active). Based on these predicted value, the core algorithm will generate the
 218 scheduled operation of light for this n day

Sử dụng cảm biến ánh sáng giúp nhận biết được độ sáng môi trường, dựa vào giá trị cường độ ánh sáng, hệ thống sẽ biết thời điểm trời tối để kích hoạt chế độ hoạt động của đèn. Bên cạnh đó, cảm biến này còn theo dõi độ sáng của đèn trong quá trình hoạt động điều này góp phần quan trọng trong cơ chế phát hiện lỗi. Với cảm biến phát hiện chuyển động giúp đèn có thể sử dụng chế độ hoạt động theo nhu cầu. Cụ thể, những thời điểm vắng phương tiện đi qua, độ sáng sẽ được điều chỉnh giảm lại và những thời điểm đông đúc hơn, độ sáng sẽ tự động điều chỉnh tăng lên. Trong nghiên cứu này, việc điều chỉnh hoạt động của đèn bằng các thuật toán và mô hình trí tuệ nhân tạo là trọng tâm hướng đến. Chúng tôi sẽ tạo ra lịch trình hoạt động cụ thể với các khoảng thời gian tương ứng với các chế độ và mức độ sáng. Lịch trình này chủ yếu dựa trên lưu lượng giao thông qua từng thời điểm đã dự đoán. Dựa vào các ngưỡng lưu lượng giao thông thì sẽ có các mức độ sáng tương ứng, chúng tôi gom các mức này thành hai chế độ chính:

- Chế độ hoạt động dựa vào cảm biến: Dựa vào số liệu lưu lượng giao thông đã dự đoán. Tại những thời điểm được dự báo là sẽ có mật độ giao thông thấp, tức là xác suất để có phương tiện đi qua thấp. Lúc đó đèn sẽ kích hoạt chế độ hoạt động dựa vào cảm biến chuyển động và duy trì một mức năng lượng thấp nhất để tiết kiệm năng lượng. Nghĩa là, khi có người hoặc phương tiện đi qua, cảm biến sẽ gửi tín hiệu và tăng cường độ độ sáng cho toàn bộ cột đèn trong cụm đèn đó. Đây là chế độ hoạt động tiết kiệm năng lượng nhất của hệ thống.
- Chế độ hoạt động dựa vào thuật toán: Những thời điểm có lưu lượng giao thông vượt ngưỡng tối thiểu thì đèn sẽ hoạt động với ba mức độ sáng lần lượt là 100%, 75% và 50% độ sáng. Mỗi mức độ sáng được kích hoạt phụ thuộc vào lưu lượng giao thông được dự đoán tại khu vực đó.

Để có thể đưa ra lịch trình hoạt động của một thiết bị phụ thuộc vào lưu lượng giao thông tại thời điểm đèn đang hoạt động và mức năng lượng lưu trữ hiện tại trong pin. Mức năng lượng này lại phụ thuộc vào thời tiết và cụ thể là mức bức xạ của mặt trời. Như vậy, yêu cầu đặt ra là cần phải có thuật toán để phối hợp các điều kiện trên sao cho đèn có thể hoạt động với n ngày tiếp theo. Để làm được việc đó trước tiên phải thực hiện ba thuật toán, dự đoán lưu lượng giao thông, dự đoán bức xạ mặt trời, dự đoán năng lượng nguồn tích trữ được tấm pin năng lượng mặt trời.



Hình 2. Illustrate energy consumption

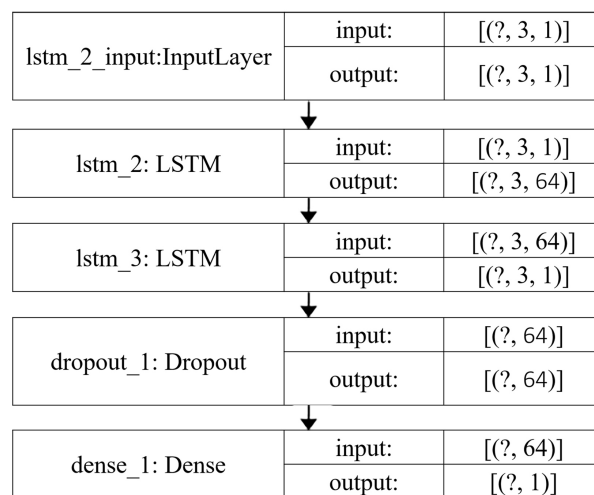
Hình 2 mô tả chu trình để lập lịch cho hệ thống. Khi có lệnh yêu cầu lập lịch cùng với số ngày n mà hệ thống phải duy trì hoạt động. Hệ thống sẽ gọi API để lấy thông tin dự báo thời tiết những ngày tới, sau đó đưa vào model Radiation Prediction thực thi để dự đoán bức xạ mặt trời trong những ngày đó. Giá trị bức xạ mặt trời vừa tạo ra được đưa vào model Power Prediction để cho ra giá trị năng lượng thu được dự đoán của những ngày tới. Bên cạnh đó, model Traffic Flow Prediction cũng được sử dụng để dự đoán lưu lượng giao thông vào những ngày đó. Cuối cùng, Control Algorithm sử dụng phối hợp giá trị năng lượng dự đoán với lưu lượng giao thông để lập lịch. Lịch trình được tạo ra được tính toán sao cho không chỉ duy trì hoạt động trong đêm hiện

tại mà còn có thể duy trì trong n ngày tới nhờ đã dự đoán năng lượng thu được và lưu lượng giao thông của n ngày đó.

3.2.1. Traffic flow prediction

Trong Smart Street Light, yếu tố then chốt quyết định đến khả năng hoạt động thích nghi của đèn đó là lưu lượng giao thông đi qua vị trí của đèn. Biết được lưu lượng sẽ giúp đèn có thể điều chỉnh độ sáng ở mức phù hợp sao cho vừa đảm bảo độ sáng cần thiết vừa đảm bảo vấn đề tiết kiệm năng lượng. Cụ thể, những thời điểm được dự đoán có lưu lượng qua lại cao cũng có nghĩa là xác suất thời điểm đó có người và phương tiện qua lại liên tục. Tại thời điểm đó, đèn sẽ hoạt động với công suất cao, thậm chí là cực đại (phụ thuộc vào mức năng lượng còn lại). Ngược lại, đèn chỉ duy trì độ sáng vừa phải có thể chuyển qua chế độ dựa vào cảm biến chuyển động để tiết kiệm năng lượng.

Chúng tôi đã xây dựng mô hình dự đoán lưu lượng giao thông dựa trên deep learning, cụ thể mô hình là sự kết hợp của LSTM (Long-short term memory) và RNN (Recurrent neural network). Để làm cho mô hình sâu hơn, chúng tôi đã xếp chồng hai LSTM layers. Nhờ vậy, có thể tận dụng được khả năng ghi nhớ của LSTM, từ đó đạt được kết quả dự đoán cao. Hình 3 mô tả kiến trúc của mô hình này. Trong đó, chúng tôi đã sử dụng bốn hidden layers, với input layer có dạng là 3×1 , 2 LSTM layer với số lượng unit cho mỗi layers là 64. Bên cạnh đó chúng tôi còn thêm lớp Dropout để giảm khả năng bị over-fitting trên tập train. Cuối cùng, các kết quả của các layer trước được đưa vào Dense layer để tạo thành giá trị dự đoán lưu lượng giao thông.



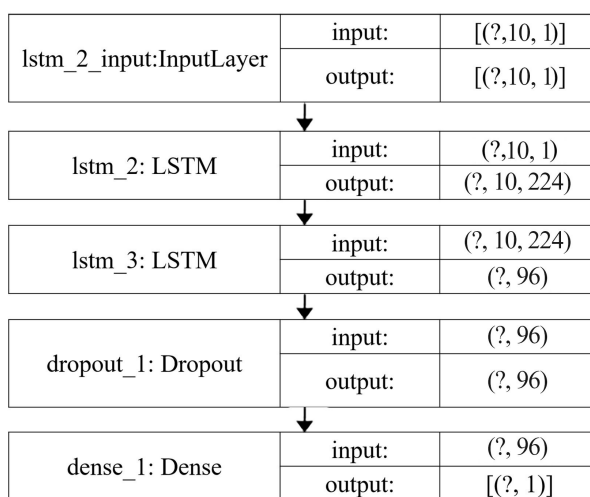
Hình 3. Traffic flow prediction model summary

3.2.2. Radiation prediction

Mặt trời là nguồn năng lượng không giới hạn, có tiềm năng lớn. Để khai thác và sử dụng hiệu quả nguồn năng lượng này thì việc đưa ra dự đoán bức xạ mặt trời là điều cần thiết, đại lượng bức xạ mặt trời thể hiện mối tương quan với các điều kiện thời tiết lúc đó như nhiệt độ, ... Việc dự đoán trước năng lượng bức xạ mặt trời giúp chúng ta có thể chủ động trong việc sử dụng, đảm bảo sự ổn định cho các hệ thống sử dụng nguồn năng lượng này. Trong hệ thống đèn đường thông minh, dự đoán năng lượng bức xạ mặt trời có yếu quyết định đến việc kiểm soát mức năng lượng đang lưu trữ và ước lượng năng lượng cuối ngày sau khi được nạp thêm từ pin năng lượng mặt trời. Từ đó hệ thống có thể đưa ra những lịch trình hoạt động với thời gian và độ sáng phù hợp để đảm bảo đèn không bị gián đoạn hoạt động do bị thiếu hụt năng lượng. Bài toán đặt ra đưa ra các dự đoán và thuật toán để cho hệ thống chỉ hoạt động được một ngày. Thách thức đặt ra, hệ thống phải hoạt động trong N ngày (số ngày có thể được quản trị viên điều chỉnh thông qua giao diện Web). đương nhiên, số ngày yêu cầu chỉ là số ngày

tối đa mà quản trị viên mong muốn, thời gian mà hệ thống có thể đáp ứng phụ thuộc vào nguồn năng lượng đang lưu trữ và năng lượng mà pin có thể thu được trong những ngày tiếp theo. Vì thế việc dự đoán năng lượng bức xạ cho những ngày kế tiếp là tiền đề để có thể dự đoán năng lượng có thể thu được vào mỗi ngày tới.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã xây dựng mô hình dự đoán bức xạ mặt trời dựa trên LSTM, kết hợp bộ nhớ ngắn hạn và mạng nơ-ron định kỳ (LSTM-RNN). Mô hình đề xuất được xếp chồng 2 lớp LSTM để tạo ra độ chính dự đoán cao hơn dựa trên chuỗi thời gian khí tượng lịch sử. Hình 4 mô tả kiến trúc các lớp của mô hình. Mô hình đề xuất có 4 lớp trong Hidden Layers, bao gồm 2 LSTM, 1 Dropout và 1 Dense. Lớp đầu vào có các giá trị đầu vào và đầu ra dạng 10x1, bao gồm các tính năng cần thiết cho việc học và đào tạo. Trong quá trình học, kết quả trả về từ lớp trước là đầu vào của lớp tiếp theo. Tiếp đến là 2 lớp LSTM với số lượng unit là 244. Lớp Dropout có vai trò loại bỏ ngẫu nhiên các đơn vị tế bào trong quá trình học LSTM. Giá trị năng lượng bức xạ cuối cùng được tổng hợp ở lớp Dense.



Hình 4. Radiation prediction model summary

3.2.3. Power prediction

Thuật toán dự đoán năng lượng thu được từ pin năng lượng mặt trời được xây dựng dựa trên mốc thời gian dự đoán và mức bức xạ mặt trời ứng với mốc thời gian đó. Để thực hiện model, chúng tôi phải trải qua thời gian dài thực nghiệm và thu thập dữ liệu từ thiết bị. Dữ liệu này chính là năng lượng thu được từ pin mặt trời theo thời gian. Sau đó model Deep Learning linear regression được sử dụng để map mối liên hệ giữa bức xạ mặt trời theo thời gian với năng lượng thu được. Dự đoán năng lượng thu được là yếu tố trực tiếp quyết định đến tổng năng lượng đang lưu trữ trong pin. Giá trị đó chính bằng năng lượng dự đoán thu được mỗi ngày cộng với mức năng lượng lưu trữ hiện tại. Sau đó, thuật toán 1 sẽ chạy các kịch bản trong các slot time đã được chia với các mức năng lượng tiêu hao khác nhau. Mục tiêu của thuật toán này vẫn để

Với sự phối hợp của các cảm biến, khi tối trời tối chế độ hoạt động sẽ được kích hoạt nhưng thay vì bật tắt cả hệ thống đèn hoạt động liên tục đến trời sáng thì hệ thống đèn thông minh này sẽ hoạt động dựa theo lịch trình nhận được từ Server. Cụ thể, ứng với mỗi khung giờ đèn sẽ hoạt động với độ sáng tương ứng như trong lịch trình.

Lịch trình này là kết quả xử lý của một chuỗi thuật toán phụ thuộc vào 2 quá trình chính:

- Dự đoán lượng tấm pin mặt trời thu được: cốt lõi dựa trên 2 model Deep Learning đó là model dự đoán bức xạ mặt trời và model dự đoán năng lượng thu được ứng với bức xạ đã dự đoán ở model trước.

- Dự đoán lưu lượng giao thông qua mỗi cụm đèn: cốt lõi là model dự đoán lưu lượng giao thông
- Cuối cùng, xây dựng thuật toán để kết hợp các giá trị năng lượng hiện có, năng lượng thu được, lưu lượng giao thông để đưa ra lịch trình sao cho khi đèn hoạt động theo lịch trình đó luôn đảm bảo năng lượng còn lại trong pin luôn lớn hơn mức năng lượng tối thiểu
- ### 3.2.4. Thuật toán lập lịch

Algorithm 1: Calculate schedule operation

Input: Number of day n , Current energy ce , Minimum energy me

Output: Schedule dictionary sc

```

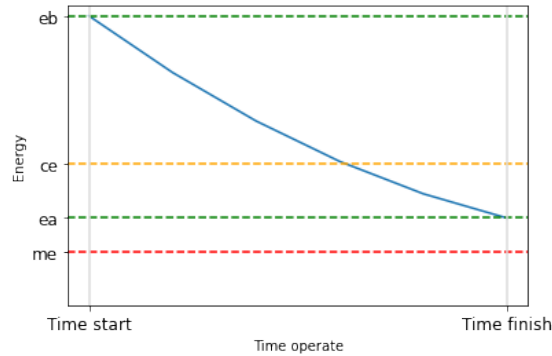
1.  $ep \leftarrow [], d \leftarrow 0$ 
2.  $eb \leftarrow [ce, 0_2, \dots, 0_n]$ 
3.  $ea \leftarrow [0_1, 0_2, \dots, 0_n]$ 
4.  $l \leftarrow [10_1, 10_2, \dots, 10_n]$ 
5.  $ep \leftarrow \text{Predict Power}(n)$ 
6. while  $d < n$  do
7.    $cs, sc = \text{Do Schedule}(d, l[d])$ 
8.   if  $eb[d] - cs < me$  then
9.     if  $l[d] > 1$  then
10.       $l[d] \leftarrow l[d] - 1$ 
11.    else
12.       $d \leftarrow d - 1$ 
13.       $l[d] \leftarrow l[d] - 1$ 
14.    end if
15.  else
16.     $ea[d] \leftarrow eb[d] - cs$ 
17.    if  $d < n - 1$  then
18.       $eb \leftarrow ea[d] + ep[d + 1]$ 
19.    end if
20.     $d \leftarrow d + 1$ 
21.  end if
22. end while
23. return  $sc$ 

```

Algorithm Overview. Gọi n là số ngày mà quản trị viên muốn hệ thống duy trì, ce là mức năng lượng lưu trữ hiện tại trong pin, me là năng lượng tối thiểu để đèn có thể hoạt động. eb, ea lần lượt là các list biểu diễn mức năng lượng trước lúc đèn hoạt động và năng lượng sau khi đèn hoạt động. Số phần tử của list eb, ea đó ứng với n ngày mà hệ thống phải duy trì và mỗi phần tử chính là năng lượng của mỗi ngày tương ứng. Hình 5 mô tả cụ thể về mối tương quan giữa mức năng lượng hiện tại ce , năng lượng dự đoán thêm ep , năng lượng tiêu thụ cs , năng lượng trước và sau khi đèn hoạt động eb_i, ea_i . Thuật toán này sẽ đưa ra một dictionary sc là lịch trình hoạt động của đèn, mỗi item trong đó chứa cặp giá trị mức năng lượng và thời gian đèn hoạt động với mức năng lượng đó. Các bước chính của thuật được trình bày dưới đây.

1. **Predict Power**, dòng 5 thực thi việc dự đoán các giá trị năng lượng thu được trong n ngày, những giá trị này sẽ được tính toán thông qua việc hiện thực model Power Prediction.
2. **Loop**, khối lệnh dòng 6 là vòng lặp quá trình đưa ra lập lịch cho từng ngày và liên tục kiểm tra điều kiện. Sao cho, ứng với mức tiêu thụ của mỗi lịch trình thì năng lượng sau khi hoạt động phải lớn năng lượng tối thiểu. Độ ưu tiên cao nhất của thuật toán là độ sáng, tiếp đến mới là năng lượng. Vậy nên, quá trình tính toán bắt đầu từ mức lớn nhất (độ sáng lớn và năng lượng tiêu thụ lớn) sau đó giảm dần nếu không thỏa mãn điều kiện về năng lượng tối thiểu.

3. **Do Schedule**, dòng 7, thực thi Do Schedule() ứng với ngày và mức năng lượng đưa ra để nhận lại lịch trình và năng lượng tiêu thụ ước tính đối với lịch trình đó.
4. **Không thỏa mãn**, dòng 8, kiểm tra năng lượng còn lại sau khi thực thi theo lịch trình đó với năng lượng tối thiểu. Trường hợp không thỏa mãn thì phải điều chỉnh để giảm năng lượng tiêu thụ. Đầu tiên, sử dụng mức l nhỏ hơn. Sau khi giảm l về cực tiểu thì tiếp tục chuyển lùi thay đổi lịch trình hoạt động của ngày trước đó.
5. **Thỏa mãn**, dòng 15, khi thỏa mãn về điều kiện năng lượng tối thiểu. Tiến hành cập nhật giá trị năng lượng sau khi tiêu thụ ứng với ngày đó vào biến ea . Sau đó, tiếp tục tính toán lịch trình và kiểm tra cho những ngày tiếp theo.



Hình 5. Illustrate energy consumption

Algorithm 2: Do Schedule

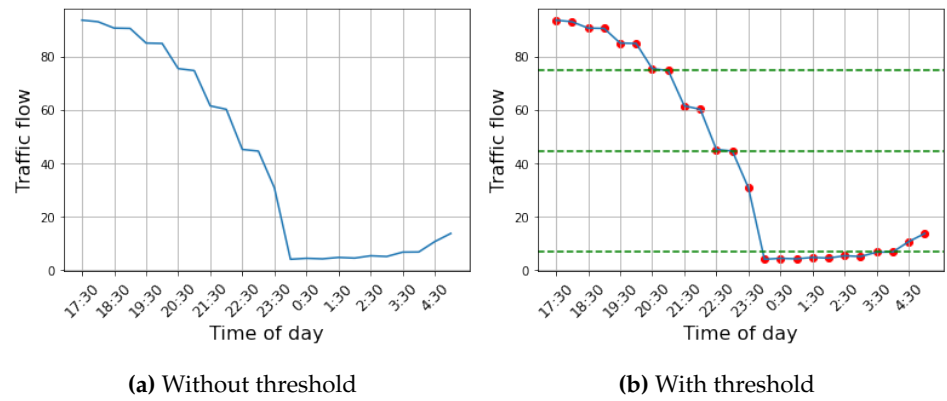
Input: Day d , Level l

Output: Consumer Energy cs , Schedule sc

1. $tf \leftarrow \text{Predict Traffic Flow}(d)$
 2. $th \leftarrow \text{Calculate Threshold}(tf, \text{Scenarios}[l])$
 3. $sc \leftarrow \text{Create Schedule}(th, tf)$
 4. **for** i, x in sc **do**
 5. $cs \leftarrow x \times \text{norm}[i]$
 6. **end for**
 7. **return** cs, sc
-

Algorithm Overview. Đặt d là ngày thứ d trong n ngày, l là mức chế độ hoạt động, ở trong nghiên cứu này chúng tôi định nghĩa 10 mức chế độ, mỗi mức $\text{Scenarios}[l]$ sẽ có phân phối tỷ lệ thời gian giữa các mức độ sáng khác nhau, mức càng cao thì có độ sáng càng lớn và tiêu tốn càng nhiều năng lượng. Bảng 1. là ví dụ minh họa tỷ lệ phân phối của 10 mức chế độ. tf, th lần lượt là biến lưu trữ giá trị dự đoán lưu lượng giao thông và các hạn mức cho từng chế độ hoạt động của đèn. Dựa vào thông tin lưu lượng giao thông và mức chế độ được thiết đặt, lịch trình hoạt động của thiết bị và giá trị năng lượng tiêu thụ ước tính cs đối với lịch trình đó sẽ được tạo thành. Các bước chính của thuật được trình bày dưới đây.

1. **Predict Traffic**, dòng 1 thực thi dự đoán lưu lượng giao thông ngày thứ d thông qua việc hiện thực model Traffic Flow Prediction. Giá trị dự đoán lưu lượng giao thông được minh họa qua hình 6a.
2. **Calculate Threshold**, dòng 2, tùy vào mức độ l , các tỷ lệ phân phối lưu lượng với thời gian đã được định nghĩa trong Scenarios sẽ được trích xuất tương ứng. Cuối cùng, kết hợp với dữ liệu lưu lượng giao thông thì các ngưỡng lưu lượng sẽ được tạo ra, ứng với mỗi ngưỡng thì đèn sẽ có độ sáng hoạt động khác nhau và tăng dần từ nhỏ đến lớn. Hình 6b minh họa biểu đồ lưu lượng giao thông với các ngưỡng đã được tính toán.



Hình 6. Traffic flow in night time

3. **Create Schedule**, dòng 3, khi đã có giá trị lưu lượng giao thông theo thời gian và các hạn mức. Bước này sẽ lồng ghép hai yếu tố đó lại tạo thành một dictionary. Mỗi item trong dictionary có key là mức cường độ ánh sáng và value của item đó chính là thời gian hoạt động đối với mức đó.
4. **Estimate Energy**, dòng 4, từ lịch trình sử dụng năng lượng đã tạo, tiến hành tổng hợp thời gian sử dụng của mỗi mức, sau đó tính mức năng lượng tiêu hao của mỗi mức bằng cách lấy thời gian sử dụng nhân với một tham số (mức năng lượng tiêu hao/đơn vị thời gian). Tham số này được tính toán qua quá trình thử nghiệm đèn hoạt động trong một đơn vị thời gian với các mức năng lượng khác nhau.

Scenarios	Tỉ lệ	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4
1		0.2	0.1	0.4	0.3
2		0.2	0.2	0.3	0.3
3		0.2	0.3	0.2	0.3
4		0.3	0.2	0.2	0.3
5		0.3	0.3	0.1	0.3
6		0.3	0.3	0.2	0.2
7		0.3	0.4	0.1	0.2
8		0.4	0.3	0.1	0.2
9		0.4	0.3	0.2	0.1
10		0.4	0.4	0.1	0.1

Bảng 1: Tỉ lệ phân phối các mức năng lượng ứng với các kịch bản

3.3. Edge-based management platform

Trong hệ thống đèn đường thông minh, một lượng lớn dữ liệu liên tục gửi về theo thời gian thực cung cấp một lượng lớn thông tin phải truyền tải, bên cạnh đó hệ thống với cốt lõi là các thuật toán, các mô hình AI, nên cần một tài nguyên tính toán rất lớn để có thể thực thi các mô hình đưa ra trình hoạt động cho một số lượng cực lớn thiết bị khi khai trên diện rộng. Vì thế, việc xây dựng một nền tảng tính toán phân tán là nhân tố quan trọng trong nền tảng quản lý của hệ thống đèn đường thông minh. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã hiện thực edge computing trên máy tính nhúng raspberry pi 4. Edge computing là đem các dịch vụ, tiện ích ở cloud computing tới gần hơn với nguồn dữ liệu để tận dụng sức mạnh tính toán phân tán, tăng tốc độ xử lý và phản hồi các tác vụ, là giải pháp được sử dụng phổ biến cho các ứng dụng như giám sát, thực tế ảo, giám sát giao thông theo thời gian thực [17].

Như đã đề cập, edge controller sẽ định kỳ nhận được thông tin trạng thái của đèn. Khi giá trị cường độ ánh sáng thu được là 0, nghĩa là trời đã tối. Lúc này, các cột đèn đường cần lịch trình hoạt động càng sớm càng tốt. Việc xử lý, tạo ra lệnh điều khiển ngay

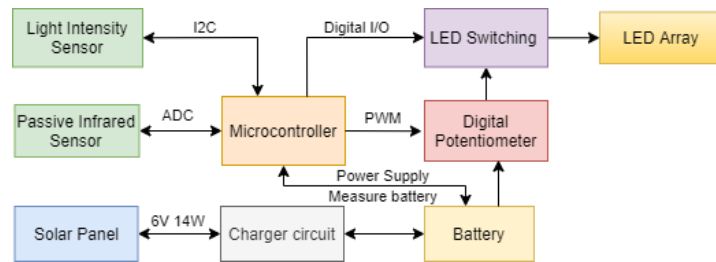
tai đây đem lại thời gian phản hồi nhanh, giảm rủi ro mất gói tin, tắc nghẽn khi chuyển về server tập trung. Quá trình tạo lịch trình diễn ra tại edge như sau:

- Hiện thực model Traffic Flow Prediction để dự đoán lưu lượng giao thông tại khu vực đó.
- Hiện thực model Radiation Prediction để dự đoán bức xạ mặt trời vào các ngày tiếp theo.
- Hiện thực model Power Prediction để dự đoán năng lượng thu được vào những ngày tới.
- Hiện thực thuật toán lập lịch để tạo ra lịch trình không những phù hợp với điều hoạt động hiện tại mà còn cả đảm bảo đủ năng lượng hoạt động cho những ngày tới.

Sau khi lịch trình được tạo ra, edge controller sẽ gửi thông tin đó về tất cả các đèn mà edge quản lý. Như vậy, quá trình được thực hiện một cách tự động, độc lập, nhanh chóng ở edge, giảm tải phần lớn công việc phải xử lý cho server cloud.

4. Evaluation results

4.1. System configuration



Hình 7. Sơ đồ mạch điện

Hình 7 mô tả sơ đồ phần cứng của hệ thống đèn mà chúng tôi đề xuất, đây cũng chính là thành phần tạo nên node controller. Trung tâm điều khiển của bộ thiết bị là board mạch có nhân xử lý là chip STM32, board mạch này tích hợp sẵn module Lora cho phép gửi nhận dữ liệu thông qua giao thức LoRaWAN từ đèn đường đến gateway.

Bộ thiết bị này trang bị tấm pin năng lượng mặt trời với khả năng cho ra nguồn điện 6V và công suất là 14W. Nguồn điện này sẽ được nạp vào pin thông qua một mạch sạc. Hệ thống trang bị mỗi đèn một pin lưu trữ có dung lượng chỉ 9600 mAh. Năng lượng từ pin vừa dùng để duy trì hoạt động của board mạch vừa là nguồn cung cấp năng lượng duy nhất của đèn.

Một bảng gồm 72 chip LED SMD5730 đã được sử dụng. Bảng LED được điều khiển bởi LED Switching, bản chất là một RELAY. RELAY sẽ đóng ngắt để bật/tắt đèn dựa vào tín hiệu digital I/O từ MCU. Bộ vi xử lý còn có thể điều chỉnh độ sáng của đèn thông qua tín hiệu xung PWM đến mạch điều chỉnh dòng điện LD06AJSA/B. Ứng với mỗi giá trị xung nhận được, mạch sẽ chuyển đổi phù hợp và cung cấp dòng điện đó cho đèn. Lượng dòng điện mà bảng LED nhận được sẽ quyết định độ sáng của đèn.

Bộ thiết bị này còn trang bị thêm các cảm biến để thu thập, đo lường các thông số hoạt động như: độ sáng, phát hiện chuyển động, dung lượng pin. Cảm biến Lux BH1750 được sử dụng để đo cường độ ánh sáng môi trường cũng như là ánh sáng đèn phát ra. MCU đọc giá trị này bằng cách gửi lệnh và nhận dữ liệu từ BH1750 thông qua giao tiếp I2C (Inter-Integrated Circuit). Thông tin về sự chuyển động được ghi nhận thông qua cảm biến PIR HC-SR501. Khi xuất hiện sự chuyển động, cảm biến sẽ phát xuất tín hiệu tích cực cao ở đầu ra, MCU sẽ đọc tín hiệu này và xác định chuyển động. Board được sử dụng có khả năng đo hiệu điện thế giữa hai cực của nguồn cấp, vậy nên giá trị dung lượng pin sẽ được board đọc và ghi nhận.

443 4.2. Observation Result

444 4.2.1. Scheduling result

TABLE IV
PREMIER SCENARIO BASED ON OPTIMAL CONTROL WITHOUT INCORPORATING
MOTION DETECTION

Time	Premier Scenario	Time	Premier Scenario
18-18:30	8 th Scenario	0-0:30	7 th Scenario
18:30-19	7 th Scenario	0:30-1	7 th Scenario
19-19:30	7 th Scenario	1-1:30	8 th Scenario
19:30-20	7 th Scenario	1:30-2	8 th Scenario
20-20:30	2 nd Scenario	2-2:30	8 th Scenario
20:30-21	2 nd Scenario	2:30-3	8 th Scenario
21-21:30	2 nd Scenario	3-3:30	8 th Scenario
21:30-22	3 rd Scenario	3:30-4	13 th Scenario
22-22:30	3 rd Scenario	4-4:30	13 th Scenario
22:30-23	3 rd Scenario	4:30-5	13 th Scenario
23-23:30	7 th Scenario	5-5:30	14 th Scenario
23:30-24	7 th Scenario	5:30-6	14 th Scenario

Hình 8. Scheduling

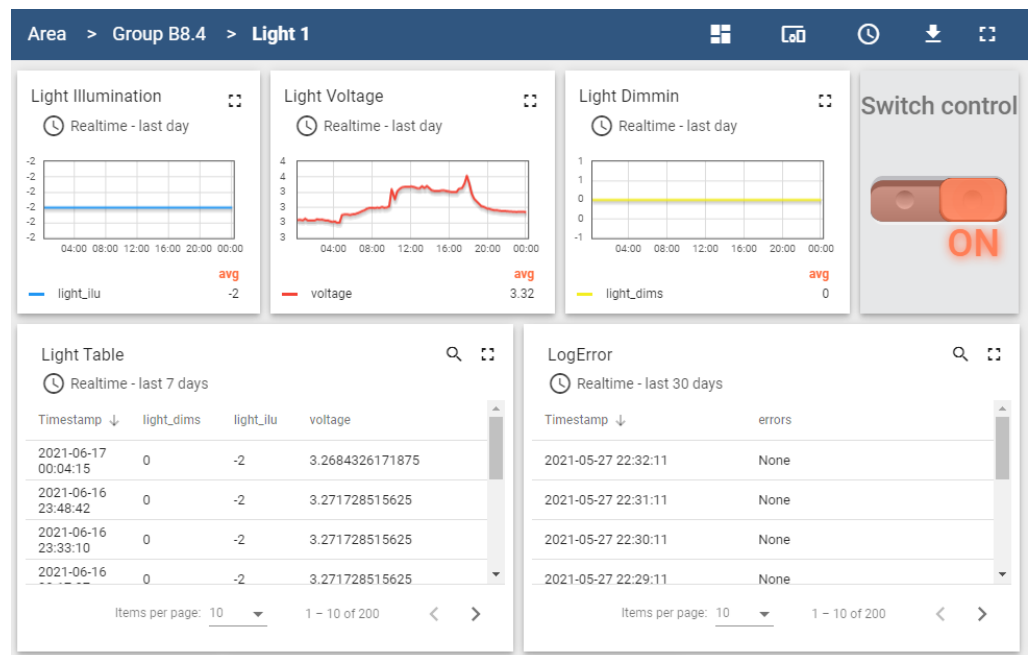
Ở trong phần này, chúng tôi sẽ mô tả kết quả hoạt động của chức năng quan trọng nhất của hệ thống đèn đường thông minh này, đó là tác vụ lập lịch. Lịch trình này sẽ được áp dụng và điều phối hoạt động cho một cụm đèn. Tại mỗi thời điểm đèn sẽ hoạt động với độ sáng ứng với mức trong lịch trình. Sẽ có 4 mức hoạt động, với mức cao nhất 4th sẽ hoạt động với 100% độ sáng, tiếp đến là 3rd, 2nd với lần lượt là 75% và 50% độ sáng. Cuối cùng với mức 1st, đèn sẽ kích hoạt chế độ hoạt động nhờ cảm biến phát hiện chuyển động.

Hình 8 là ảnh chụp màn hình của trang web quản trị. Hình này chứa bảng lịch trình hoạt động của thiết bị thử nghiệm. Theo lịch trình này, đèn sẽ bắt đầu hoạt động vào ...h và kết thúc vào ...h. Thời gian bắt đầu hoạt động chính là thời điểm trời tối lúc mà giá trị cảm biến ánh sáng thu về gần bằng 0. Thời điểm kết thúc có thể sớm hơn phụ thuộc vào thời điểm trời sáng. Hình 4 là biểu đồ thể hiện lưu lượng giao thông vào đêm thiết bị hoạt động. Dựa biểu đồ và lịch trình có thể thấy những lúc dự báo có lưu lượng giao thông cao thì đèn sẽ hoạt động với mức độ sáng lớn hơn và ngược lại.

445 4.2.2. Failure Detection Test

Chúng tôi đã tiến hành kiểm tra tính năng phát hiện lỗi của hệ thống đèn thông minh này. Để thử nghiệm, chúng tôi đã ngắt kết nối từ node controller để đèn không thể giao tiếp với hệ thống, bên cạnh đó chúng tôi sử dụng một bảng LED không hoạt động để kiểm tra khả năng phát hiện đèn bị hỏng. Khi hệ thống đã kích hoạt đèn hoạt động nhưng giá trị độ ánh từ cảm biến Lux BH1750 đọc được là 0 hoặc nhỏ hơn giá trị định mức, lúc đó những cảnh báo sẽ được tạo ra trên Dashboard và sẽ có email tự động gửi về cho quản trị viên.

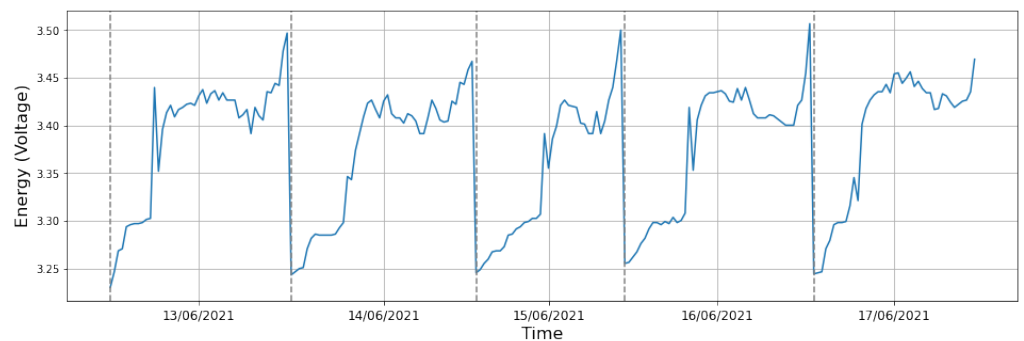
Hình 9 là ảnh chụp màn hình của trang web quản trị. Trong hệ thống chúng tôi quy định trạng thái của mỗi cột đèn với 3 mức độ tương ứng với 3 màu sắc. Những dòng dữ liệu có trạng thái màu xanh nghĩa là thiết bị đang hoạt động bình thường. Dòng có trạng thái màu vàng là thiết bị đang bị cảnh báo. Cụ thể trong hình có 2 dòng cảnh báo do thiết bị bị mất kết nối trong lần lượt 30 và 45 phút. Dòng trạng thái màu đỏ là mức nguy hiểm cần quản trị viên can thiệp. Trong trường hợp này tín hiệu sự cố do thiết bị đèn



Hình 9. Dashboard

không hoạt động và thiết bị mất kết nối trong 60 phút sẽ được gửi cho quản trị viên xử lý.

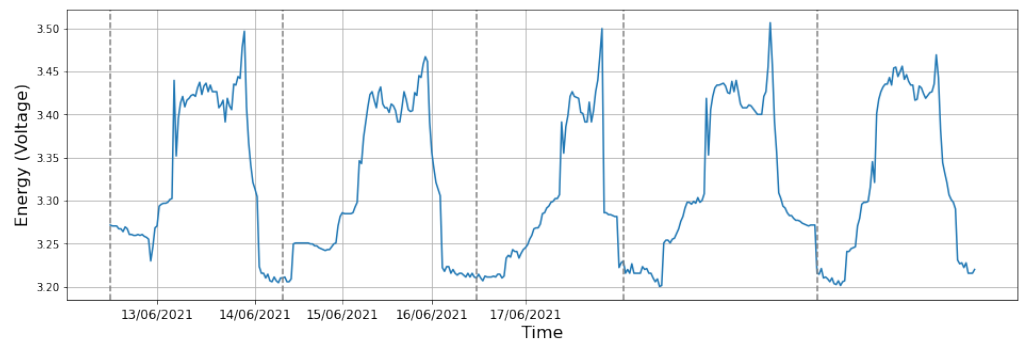
4.2.3. Power Production



Hình 10. Power monitoring

Trong phần này, chúng tôi sẽ trình bày kết quả quá trình theo dõi năng lượng lưu trữ dựa vào mạch đo mà hệ thống đề xuất. Trong thực nghiệm, thiết bị liên tục đọc giá trị mức năng lượng hiện tại của pin sau mỗi 15 phút vào gửi về server. Kết quả năng lượng thu được thể hiện qua Hình ??.

Hình ?? biểu diễn giá trị năng lượng vào thời gian có bức xạ mặt trời (khoảng 5h - 18h) của pin trong 5 ngày. Biểu đồ thể hiện sự gia tăng năng lượng theo thời gian trong mỗi ngày, điều này có thể giải thích do thời gian càng về dần chiều, bức xạ mặt trời càng tăng dẫn đến năng lượng tích lũy cũng tăng theo. Hình 5 thể hiện giá trị dự đoán radiation trong 5 ngày đó. Dựa vào Hình ?? và Hình 5 có thể hình dung rõ sự tương quan giữa chỉ số bức xạ mặt trời với sự thay đổi năng lượng của pin.



Hình 11. Power consumption

4.2.4. Power Consumption

5. Conclusion

References

- Shahzad, G.; Yang, H.; Ahmad, A.W.; Lee, C. Energy-efficient intelligent street lighting system using traffic-adaptive control. *IEEE Sensors Journal* **2016**, *16*, 5397–5405.
- Ali, M.; Orabi, M.; Abdelkarim, E.; Qahouq, J.A.A.; El Aroudi, A. Design and development of energy-free solar street LED light system. 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies-Middle East. IEEE, 2011, pp. 1–7.
- Bhairi, M.N.; Kangle, S.S.; Edake, M.S.; Madgundi, B.S.; Bhosale, V. Design and implementation of smart solar LED street light. 2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI). IEEE, 2017, pp. 509–512.
- Siregar, S.; Soegiarto, D. Solar panel and battery street light monitoring system using GSM wireless communication system. 2014 2nd International conference on Information and Communication technology (ICoICT). IEEE, 2014, pp. 272–275.
- Sindhu, A.; George, J.; Roy, S.; Chandra, J. Smart streetlight using IR sensors. *IOSR Journal of Mobile Computing & Application (IOSR-JMCA)* **2016**, *3*, 39–44.
- Natu, O.; Chavan, S. GSM based smart street light monitoring and control system. *International Journal on Computer Science and Engineering* **2013**, *5*, 187.
- Mahoor, M.; Salmasi, F.R.; Najafabadi, T.A. A hierarchical smart street lighting system with brute-force energy optimization. *IEEE Sensors Journal* **2017**, *17*, 2871–2879.
- Yoshiura, N.; Fujii, Y.; Ohta, N. Smart street light system looking like usual street lights based on sensor networks. 2013 13th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). IEEE, 2013, pp. 633–637.
- Kaleem, Z.; Ahmad, I.; Lee, C. Smart and energy efficient led street light control system using ZigBee network. 2014 12th International Conference on Frontiers of Information Technology. IEEE, 2014, pp. 361–365.
- Daely, P.T.; Reda, H.T.; Satrya, G.B.; Kim, J.W.; Shin, S.Y. Design of smart LED streetlight system for smart city with web-based management system. *IEEE Sensors Journal* **2017**, *17*, 6100–6110.
- Marino, F.; Leccese, F.; Pizzuti, S. Adaptive street lighting predictive control. *Energy Procedia* **2017**, *111*, 790–799.
- Knobloch, F.; Braunschweig, N. A traffic-aware moving light system featuring optimal energy efficiency. *IEEE Sensors Journal* **2017**, *17*, 7731–7740.
- Pasolini, G.; Buratti, C.; Feltrin, L.; Zabini, F.; De Castro, C.; Verdone, R.; Andrisano, O. Smart city pilot projects using LoRa and IEEE802. 15.4 technologies. *Sensors* **2018**, *18*, 1118.
- Jia, G.; Han, G.; Li, A.; Du, J. SSL: Smart street lamp based on fog computing for smarter cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **2018**, *14*, 4995–5004.
- Mikhaylov, K.; Petaejaejaervi, J.; Haenninen, T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology. European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference. VDE, 2016, pp. 1–6.
- Mekki, K.; Bajic, E.; Chaxel, F.; Meyer, F. Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. 2018 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops). IEEE, 2018, pp. 197–202.

-
- 529 17. Khan, W.Z.; Ahmed, E.; Hakak, S.; Yaqoob, I.; Ahmed, A. Edge computing: A survey. *Future*
530 *Generation Computer Systems* **2019**, *97*, 219–235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.050>.

