

Projeto e Desenvolvimento de Sistema Não Invasivo para Eficiência Energética em Aparelhos de Ar Condicionado

Isabela Felix da Silva
Graduanda de Engenharia Elétrica
Escola Politécnica
PUC Goiás
Goiânia, Brasil
felix_isabela@yahoo.com.br

Matheus de Moura Gomes
Graduando de Engenharia Elétrica
Escola Politécnica
PUC Goiás
Goiânia, Brasil
matheusmourag@gmail.com

Wanderson Rainer H. de Araújo
Orientador
Escola Politécnica
PUC Goiás
Goiânia, Brasil
rainer@pucgoias.edu.br

Resumo—A busca por conforto ambiental em instalações prediais e comerciais tem sido alvo de pesquisa e atualizações normativas em várias áreas da engenharia e arquitetura. O conforto térmico, especificamente, depende da utilização de aparelhos condicionadores de ar que, dependendo da forma de utilização, pode impactar negativamente o consumo de energia elétrica. Este trabalho apresenta o projeto e o desenvolvimento de um sistema para minimizar o impacto que aparelhos de ar condicionado podem proporcionar em ambientes nos quais é desejado o conforto térmico associado à eficiência energética da instalação. O sistema é integrado por elementos eletroeletrônicos que, além de evitarem o uso do ar condicionado em horários inadequados, ajusta a temperatura do aparelho conforme o horário do dia e a temperatura externa ao ambiente. Resultados preliminares de funcionamento são apresentados de forma a demonstrar a potencialidade do sistema.

Index Terms—Ar condicionado, conforto térmico, eficiência energética, protocolos IR.

I. INTRODUÇÃO

O conforto ambiental em instalações prediais é tópico de substancial relevância em diversos contextos, tais como na legislação trabalhista, nas normas das instalações e na comunidade científica. O conforto ambiental estabelece critérios de luminosidade, temperatura, ruídos sonoros e umidade de forma a garantir o bem estar dos indivíduos que ocupam determinado ambiente. Este trabalho concentra estudos e análise no fator temperatura, uma vez que, na maioria das vezes, esta grandeza é manipulada por aparelhos de ar condicionado cuja utilização pode impactar negativamente a eficiência energética da instalação. O impacto negativo de aparelhos de ar condicionado no consumo de energia elétrica normalmente ocorre em dois cenários: i) no funcionamento do aparelho em horários inadequados e ii) na utilização incorreta do aparelho por parte do usuário.

Este trabalho apresenta o projeto e o desenvolvimento de um sistema eletroeletrônico que pode mitigar os impactos negativos do uso de aparelhos de ar condicionado citados anteriormente. O sistema proposto possui a capacidade de i) desligar o aparelho de ar condicionado quando detectado

horário inapropriado de funcionamento e ii) ajusta automaticamente a temperatura de operação do aparelho considerando a temperatura externa ao ambiente. O sistema apresenta característica não invasiva, uma vez que, para seu funcionamento, não exige intervenção nas instalações estruturais ou elétricas preexistentes. Outra potencialidade do sistema proposto é a capacidade de atuar em aparelhos de ar condicionado de diferentes fabricantes, pois conta com a possibilidade de engenharia reversa no protocolo infravermelho do controle remoto que manipula o ar condicionado.

A partir de regras de monitoramento estabelecidas para que ocorra o ajuste da temperatura do ar condicionado, assim proporcionando conforto e eficiência energética.

Resultados preliminares de funcionamento são apresentados de forma a consolidar a potencialidade do sistema, também servindo de base para outros estudos como na análise de dados focados em eficiência energética.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando o conforto térmico no contexto trabalhista, a legislação nacional estabelece que a organização empregadora deve adotar medidas de controle da temperatura, da velocidade do ar e da umidade com a finalidade de proporcionar conforto térmico nas situações de trabalho [1]. Esta legislação, representada pela norma regulamentadora NR 17 (ergonomia), estabelece que, para ambientes climatizados, a temperatura do ar deve permanecer entre 18°C e 25°C. Portanto, percebe-se a necessidade de, para ambientes climatizados, garantir uma faixa de operação para aparelhos de ar condicionado.

Além da NR 17, a NBR 15575, que apresenta as normas para desempenho das edificações, estabelece, entre outros fatores, que a instalação deve atender à legislação vigente, propiciando condições de salubridade no interior da edificação, considerando as condições de umidade e temperatura no interior da unidade habitacional, e o tipo dos sistemas utilizados na construção [2].

Desta forma, percebe-se que o ajuste adequado da temperatura para ambientes climatizados é um procedimento

relevante considerando as normas nacionais. Por outro lado, a comunidade científica concentra esforços na tentativa de minimizar os impactos da climatização na eficiência energética das instalações.

Em [3], um aparelho de ar condicionado é alimentado com módulos fotovoltaicos e com controle Fuzzy para a temperatura, garantindo menor consumo energético e, consequentemente, menor custo operacional. Os tempos de acionamento e desligamento do compressor de aparelhos de ar condicionado são analisados em [4] de forma a se obter um modelo que relaciona tais tempos com o consumo de energia elétrica. Em [5] é analisado o desempenho de aparelhos de ar condicionado alimentados em corrente contínua, disponibilizados no mercado internacional. Um sistema baseado em IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas) é apresentado em [6]. Neste último estudo, o sinal infravermelho proveniente do controle remoto que aciona o ar condicionado deve ser considerado. Estes sinais possuem diferentes comportamentos, pois cada fabricante possui seu protocolo próprio para os sinais IR (*Infrared* - infravermelho), conforme indicado em [7], onde um sistema de hardware configurável com FPGA (*Field Programmable Gate Array* - matriz de portas programáveis) é empregado para aquisição de sinais IR.

Como exemplo, a Fig. 1 ilustra o diagrama temporal do protocolo IR do fabricante NEC [8].

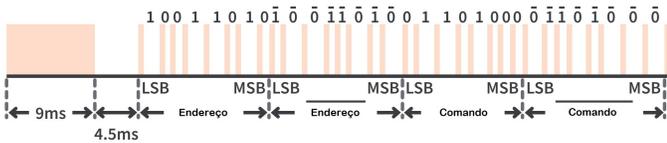


Figura 1. Diagrama temporal do protocolo IR (NEC).

Conforme pode ser observado na Fig. 1, o protocolo NEC é baseado em um conjunto de bits referentes ao endereço do aparelho e do comando referente à tecla do controle remoto associado. Na figura, LSB é o bit menos significativo (*Least Significant Bit*) e MSB é o bit mais significativo (*Most Significant Bit*) de cada byte enviado. Neste caso, os bits são modulados com frequência de 38 kHz e com codificação por distância de pulso. Outros protocolos empregam codificação Manchester ou demais codificações para potencialização da distância alcançada pelo LED transmissor [8].

Considerando as informações relacionadas à necessidade de ajuste da temperatura de aparelhos de ar condicionado em ambientes climatizados e o funcionamento destes equipamentos baseado em protocolos infravermelho, as próximas seções apresentam como o sistema proposto neste trabalho foi desenvolvido bem como os resultados preliminares de sua operação.

III. METODOLOGIA

Conforme exposto na seção anterior, os aparelhos de ar condicionado possuem sua operação baseada em sinais infravermelhos provenientes de seus respectivos controles remotos.

Com o intuito de elaborar um sistema que seja capaz de funcionar com aparelhos de ar de qualquer fabricante, o primeiro passo deste estudo foi a elaboração de um sistema capaz de identificar o protocolo de comunicação emitido pelo LED IR do controle remoto, seja o protocolo aberto ou proprietário. A Fig. 2 ilustra a primeira etapa do sistema e os elementos empregados para identificação do protocolo IR:

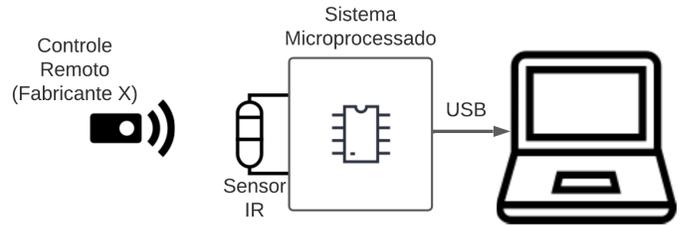


Figura 2. Diagrama do sistema implementado para identificação do protocolo IR.

Na Fig. 2, o controle remoto do aparelho de ar condicionado, que pode ser de qualquer fabricante, envia o sinal de uma determinada tecla e o sensor IR converte o sinal proveniente do controle em bits seriais, aplicados a uma entrada digital do sistema microprocessado. Este sistema, por sua vez, possui um código que ao receber os bits provenientes do sensor IR envia os níveis lógicos e o tempo de duração de cada bit para o computador via interface USB. Desta forma, independente do protocolo utilizado pelo controle remoto, tem-se no computador qual o comportamento dos bits de cada tecla desejada.

Uma vez que o sinal IR é decodificado pelo sistema microprocessado da Fig. 2, a próxima etapa do desenvolvimento é a montagem de um segundo sistema para transmissão dos dados obtidos no procedimento anterior para o aparelho de ar condicionado referente ao controle remoto testado. Este novo sistema é ilustrado na Fig. 3.

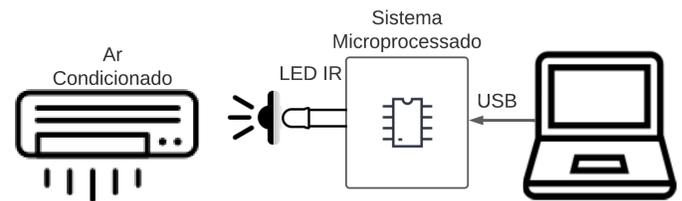


Figura 3. Diagrama do sistema implementado para teste de identificação do protocolo IR.

Com o sistema da Fig. 3 é possível verificar se o protocolo foi identificado adequadamente, proporcionando um processo de engenharia reversa no protocolo IR, possibilitando o sistema operar com aparelhos de ar condicionado independente do fabricante. Como exposto em seções anteriores, esta verificação é importante para que o sistema atue no aparelho de ar condicionado através de sinais IR, de forma a não exigir intervenções em estruturas físicas ou elétricas da instalação.

Conforme exposto anteriormente, o sistema proposto neste estudo, proporciona também o desligamento do aparelho de ar condicionado em horários inadequados, ou seja, em horários nos quais a instalação não conta com a presença de pessoas. O sistema permite que os horários inadequados sejam previamente configurados para proporcionar o desligamento do equipamento. Para isso, o circuito eletroeletrônico desenvolvido conta com um RTC (*Real Time Clock* - Relógio de Tempo Real) para monitoramento do horário. Além disso, o sistema, mesmo em períodos de funcionamento do ar condicionado, promove ajustes na temperatura do ar condicionado alterando a temperatura ajustada no aparelho em função da temperatura externa ao ambiente climatizado. Para isto, foi desenvolvido o sistema ilustrado na Fig. 4.

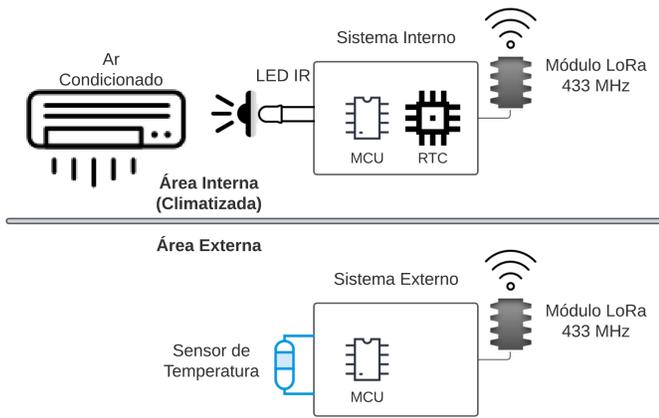


Figura 4. Diagrama dos sistemas interno e externo para ajuste remoto de temperatura do ar condicionado.

Na Fig. 4 é possível verificar que o sistema foi dividido em dois: i) sistema interno e ii) sistema externo. O sistema interno possui um circuito eletroeletrônico que conta com um RTC para desligamento do ar condicionado em horários predeterminados. O sistema externo possui um sensor de temperatura para que, dependendo da temperatura externa ao ambiente, o ar condicionado no ambiente climatizado possa ter seu valor de temperatura ajustado adequadamente pelo sistema interno. Para a comunicação entre os dois sistemas foram empregados transceptores LoRa (*Long Range*) que implementam comunicação serial em rádio frequência com 433 MHz. Este módulo de comunicação remota foi empregado considerando suas características atrativas, tais como longo alcance e baixo consumo de energia [9].

O sistema da Fig. 4 é integrado por um LED IR difuso convencional de 5 mm. Porém, com o objetivo de potencializar o alcance do infravermelho emitido pelo sistema desenvolvido, este LED IR foi substituído por um modelo específico com comprimento de onda de 940 nm, proporcionando maior potência de radiação e tornando o sistema desenvolvido mais versátil para sua instalação. Sendo assim, outros testes foram realizados de forma a se obter de forma quantitativa a contribuição que o novo LED IR traria. A Fig. 5 apresenta a

capacidade de condução de corrente direta do LED em função da temperatura ambiente.

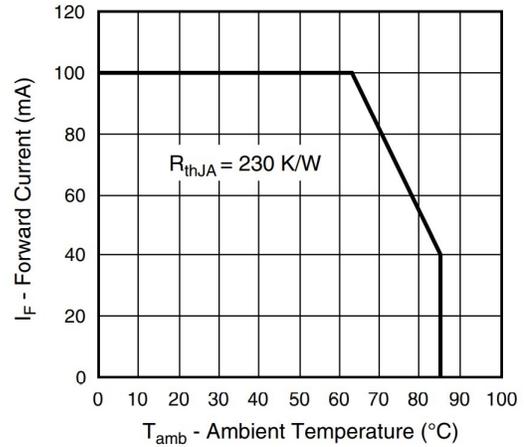


Figura 5. Capacidade de condução de corrente do LED TSAL6100 em função da temperatura.

Este gráfico foi utilizado no teste de forma a se observar qual a distância alcançada em função da corrente direta sem ultrapassar o limite de potência do componente. Desta forma, testes foram realizados de forma a aumentar a corrente direta deste novo LED IR para verificação do impacto na distância alcançada pelo sistema desenvolvido em relação ao aparelho de ar condicionado.

IV. RESULTADOS

Para os sistemas microprocessados das figuras 2 e 3 foi empregada a plataforma Arduino Uno, com o microcontrolador ATmega328. Este dispositivo foi considerado para o desenvolvimento deste estudo considerando as potencialidades proporcionadas pelo mesmo, tais como quantidade adequada de I/O para o projeto, entradas analógicas e digitais e módulo de comunicação USART [10]. Para o teste do sistema da Fig. 2, foi utilizado o receptor IR TSOP2238, capaz de demodular o sinal IR proveniente do controle remoto com frequência de 38 kHz. Este teste foi realizado em um aparelho de ar condicionado do fabricante Fujitsu, instalado na sala 506 do bloco E da área 3 da PUC Goiás. Para verificação do sinal IR convertido em sinal elétrico, um osciloscópio foi inserido na saída do TSOP2238 de forma a verificar a forma de onda aplicada à entrada do microcontrolador. O resultado obtido nesta medição é ilustrado nas figuras 6 e 7.

modelo usado foi o E32-TTL-100. Para este teste, ambos os microcontroladores dos sistemas interno e externo foram programados de forma a estabelecerem uma comunicação bidirecional. Durante os testes, foi constatado que, apesar do fabricante estabelecer que os transceptores podem operar com tensão de alimentação de até $5,2\text{ V}$, foi observado que os mesmos apresentam maior estabilidade operando a $3,3\text{ V}$, ocasião na qual o consumo de corrente de cada módulo atinge no máximo 120 mA durante a transmissão. Este teste de comunicação bidirecional foi bem sucedido, possibilitando a continuidade do desenvolvimento do estudo.

Considerando a instabilidade apresentada pelos módulos LoRa E32-TTL-100, os mesmos foram substituídos por transceptores RF modelo APC220, os quais operam com frequência de 433 MHz e tensão de alimentação de 5 V . O APC220 apresentou estabilidade de comunicação superior ao E32-TTL-100 e, portanto, foi mantido como transceptor final do sistema.

Após a solução dos obstáculos apresentados pelos transceptores LoRa, foram estabelecidas as regras de funcionamento do sistema, tanto o interno quanto o externo. De forma, que estão envolvidos os horários pre determinados em que o aparelho de ar condicionado deve desligar e a comunicação entre a placa que fica dentro do ambiente e a que está localizada na parte externa. Está representado no fluxograma a seguir:

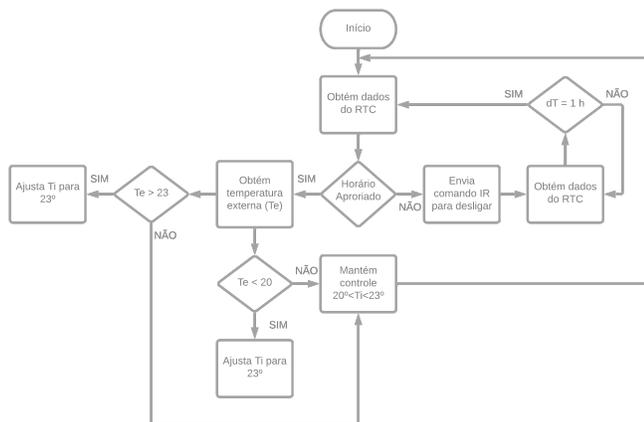


Figura 10. Fluxograma do Sistema.

O fluxograma da Fig. 10 ilustra como as informações de horário e temperatura são avaliadas pelo sistema. No fluxograma, observa-se que o sistema funciona em constante verificação do horário atual, obtido via RTC. Esta informação preliminar determina se o aparelho de ar condicionado deve ser desligado ou não. Este parâmetro pode ser facilmente ajustado no firmware do microcontrolador da área interna, podendo adequar o sistema à realidade do ambiente onde será instalado.

Caso o horário obtido via RTC seja um horário adequado de funcionamento do aparelho do ar condicionado, inicia-se um processo de comunicação com o microcontrolador da área externa de forma a se obter a temperatura externa ao ambiente. A partir deste valor, a temperatura ajustada no ar condicionado é alterada de forma a manter a referência de ajuste dentro de

uma faixa pré estabelecida para o ar condicionado. Esta faixa pode igualmente ser alterada no firmware do microcontrolador para adequar o sistema às condições climáticas de diferentes regiões. Contudo, o objetivo nesta etapa é manter uma faixa de operação do aparelho de ar condicionado com foco na redução do consumo de energia elétrica.

Conforme descrito na seção anterior, o LED IR do sistema interno foi alterado para um modelo com maior potência de radiação, sendo ele o modelo TSAL6100, do fabricante Vishay. A substituição de um LED IR convencional para o TSAL6100 garantiu que o sistema pudesse ser instalado em distâncias superiores a 4 m em relação ao aparelho de ar condicionado, garantindo ainda mais versatilidade de instalação do sistema. Os testes foram realizados mantendo a corrente direta do TSAL6100 abaixo de 100 mA , como estabelecido na região de segurança de operação ilustrada na Fig. 5.

A Fig. 11 apresenta a fotografia de um dos protótipos desenvolvidos. Como pode ser observado, o sistema é alimentado com um conjunto de 3 pilhas AA de $1,5\text{ V}$.



Figura 11. Fotografias do protótipo desenvolvido (placa interna).

Como sugestão para trabalhos futuros, apresenta-se o estudo de técnicas de programação e projeto de hardware para minimizar o consumo de energia do sistema, prolongando a vida útil das pilhas.

V. DISCUSSÕES

Por fim, o sistema demonstrou funcionamento adequado de acordo com a proposta inicial, proporcionando: i) obtenção de dados de data e hora do RTC, ii) comunicação com protocolo IR independente do fabricante do ar condicionado, iii) comunicação com sistema externo para coleta de temperatura e iv) ajuste automático da referência de temperatura do ar condicionado para a faixa pré estabelecida. Contudo, o impacto na economia de energia elétrica proporcionado pelo sistema deve ser medido adequadamente, e esta medida apresenta dificuldades operacionais, o que se sugere como continuação deste estudo. Tais dificuldades operacionais estão relacionadas à obtenção de tensão e corrente no quadro de distribuição onde está localizado o circuito do ar condicionado, tarefa que envolve desenvolvimento e medições, metodologias que se apresentam além do escopo deste trabalho. Conforme a Resolução ANEEL n. 505 de 26/11/2001, a análise de sistemas por amostragem deve envolver coleta de dados com período de amostragem de 10 minutos durante 7 dias, totalizando 1008 pontos. Desta forma, torna-se necessário outro estudo

para levantamento dos impactos energéticos proporcionados pelo sistema.

Contudo, estudos preliminares realizados em um aparelho de mesmo fabricante e mesma potência (36.000 BTU) indicam uma potência aparente $S = 3,1 + j1,6 \text{ kVA}$, porém o aparelho em questão é convencional e não inverter. Isso prejudica a análise do impacto energético proporcionado pelo sistema desenvolvido, uma vez que este tipo de ar condicionado possui picos de energia quando liga ou desliga o compressor. Aparelhos inverter mantêm o compressor acionado variando sua velocidade e, conseqüentemente, minimizando o consumo. Logo, um estudo com mais metodologias direcionadas para esta análise faz-se necessário para medições de redução no consumo de energia elétrica proporcionada pelo sistemas desenvolvido, tanto em aparelhos convencionais quanto inverter.

VI. CONCLUSÃO

A comunicação de dados estabelecida via sinais infravermelhos proporciona o acionamento e controle de dispositivos remotamente sem a necessidade de intervenção nas instalações. Neste trabalho, o LED IR TSAL6100 apresentou melhores resultados em comparação ao LED convencional. Neste trabalho, foi aplicado um processo de engenharia reversa nos sinais IR proporcionados pelos controles remotos de aparelhos de ar condicionado de três fabricantes: Fujitsu, Carrier e Samsung. Este processo de identificação do protocolo desenvolvido pelo fabricante permite a construção de outros hardwares capazes de manipular remotamente tais aparelhos.

Este trabalho, em suas etapas desenvolvidas até o momento, confirmou que é possível promover ajustes em aparelhos de ar condicionado de maneira não invasiva, mesmo com protocolos IR proprietários.

Testes de comunicação foram realizados com os transceptores LoRa e o RF modelo APC220, onde este último se destaca por ser mais estável, com a finalidade de otimizar a troca de informações entre dois sistemas, um interno e outro externo ao ambiente climatizado de forma a estabelecer posteriormente uma regra de ajuste da temperatura do ar condicionado com base na temperatura externa ao ambiente, permitindo proporcionar o conforto térmico associado à potencialização da eficiência energética da instalação.

Além disso, com o LED IR TSAL6100 a distância de alcance do sistema aumentou, logo reforçando que o sistema não é invasivo por não interferir na infraestrutura do ambiente e ainda a disponibilidade de não precisar ser instalado muito próximo do aparelho de ar condicionado.

REFERÊNCIAS

- [1] Ministério do Trabalho. NR 17 - Ergonomia. Portaria MTP n. 423 de 07 de outubro de 2021.
- [2] ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] K. Ravindra, M. N. Rao and V. S. N. K. Chaitanya, "Renewable energy source allocation of air-conditioner using fuzzy logic", 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2C2.2017.8321813.
- [4] K. M. N. Hassan, S. Biswas and M. F. Uddin, "Electrical Power Consumption Profile Modelling of Air Conditioner for Smart Grid Load Management", 2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2020, pp. 178-181, doi: 10.1109/ICECE51571.2020.9393101.
- [5] A. Al-Subhi and I. El-Amin, "Experimental performance analysis of existing conventional AC air conditioner and corresponding new pure DC air conditioner", 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM), 2017, pp. 330-336, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001065.
- [6] W. Song, N. Feng, Y. Tian and S. Fong, "An IoT-Based Smart Controlling System of Air Conditioner for High Energy Efficiency", 2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), 2017, pp. 442-449, doi: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2017.72.
- [7] C. Arunprakash and K. R. K. Sastry, "Implementation of Air Conditioner Infrared Protocol on a Reconfigurable Hardware", 2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 2018, pp. 787-790, doi: 10.1109/CONFLUENCE.2018.8442852.
- [8] Jianjun Lv, Zhishu Li, Mingyi Mao, Qingfu Huang and Zhicheng Chen, "A new USB home appliances based on PC and infrared remote control protocol", 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 2010, pp. 572-575, doi: 10.1109/CCTAE.2010.5544444.
- [9] Z. Su, Y. Lin and V. R. L. Shen, "Intelligent Environmental Monitoring System based on LoRa Long Range Technology", 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 2019, pp. 354-357, doi: 10.1109/ECICE47484.2019.8942778.
- [10] Y. Tan, A. Setiaji, E. Wismiana, M. Yunus, M. R. Effendi and A. Munir, "IoT System Implementation for ATmega328 Microcontroller Based Home Door Control", 2019 IEEE 5th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICWT47785.2019.8978214.