

MQTT based Monitoring and Management System for Distributed Generation Units

Kevin R. Costa,
Fernando L. M. Antunes,
Anderson Jhones P. Nascimento
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil, 60440-554
kevincosta@alu.ufc.br, fantunes@dee.ufc.br,
anderson_5jhones@hotmail.com

Adão L. Muniz, Ricardo Castelo,
Gabriel Marçal da C. P. Carvalho
Secretária de Infraestrutura do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil, 60822-325
adao.muniz@seinfra.ce.gov.br,
ricardo.castelo@seinfra.ce.gov.br,
gabriel.carvalho@seinfra.ce.gov.br

Resumo—Cerca de 80% de toda a geração distribuída instalada no Brasil é composta de sistemas de até 75 kWp. No entanto, o medidor bidirecional instalado nessas unidades mede apenas a diferença instantânea entre o que é gerado e o que é consumido, deixando o consumidor impossibilitado de acompanhar o consumo real da unidade. Vendo isso, esse trabalho propõe um sistema de monitoramento para unidades com GD. Além de medir a energia gerada e consumida, o sistema realiza ainda o acionamento remoto de cargas, possibilitando assim um bom gerenciamento energético. O sistema de monitoramento é baseado no microcontrolador ESP32, que realiza o envio dos dados via protocolo MQTT. Os dados coletados são exibidos em uma interface web, desenvolvida utilizando o framework Ruby on Rails, e armazenados em um banco de dados PostgreSQL. Resultados experimentais são apresentados a fim de avaliar a precisão e operabilidade do sistema proposto.

Keywords – Sistemas de Monitoramento, Internet das Coisas, Casas Inteligentes, Redes Inteligentes, Eficiência Energética

I. INTRODUÇÃO

Desde que foi regulamentada em 17 de Abril de 2012 pela Resolução Normativa (RN) nº 482, a Geração Distribuída (GD) vem crescendo no Brasil. Apenas em 2019 foram 121.126 novas instalações, um total de 1,55 MW [1]. Devido a concessões regulatórias, a maior parte da GD consiste de sistemas de até 75 kWp, que em Setembro de 2020 representavam 80% dos sistemas instalados, segundos dados da ANEEL[2].

Conforme regulamentado pela RN nº 482/2012 [3], o acesso a rede de distribuição para unidades com GD é realizado através da troca do medidor unidirecional por outro bidirecional, o que possibilita a contabilização da energia injetada na rede quando está sendo gerado mais do que é consumido, e da energia consumida em momentos que é consumido mais do que é injetado. Desse modo, ao final do mês a energia injetada é deduzida do consumo registrado e o cliente paga apenas o excedente que consumiu. Caso todo o consumo seja compensado, o excedente de energia injetada é convertido em créditos de energia, que podem ser compensados nas próximas faturas. Apesar de ser ideal para efeitos de faturamento, este

procedimento deixa o consumidor impossibilitado de acompanhar o consumo real da sua unidade, além de levá-lo a pensar que o consumo registrado na fatura de energia seria o consumo real da sua unidade.

Uma vez que 79,5% das unidades com GD no Brasil [4] estão em ambientes residenciais, formado na maior parte dos casos por não-especialistas na área de energias, este trabalho objetiva prover um forma fácil do consumidor gerenciar sua unidade, economizar energia e otimizar o uso da energia produzida.

A geração distribuída trouxe um novo paradigma para o sistema elétrico, o consumidor antes cativo passou a gerar sua própria energia e a injetar o excedente na rede, se tornando assim um prosumidor [5]. Nesse sentido, a medição inteligente e o fluxo de informação bidirecional se tornaram imprescindíveis para acompanhar os novos avanços.

Neste trabalho, um sistema de monitoramento de baixo custo para unidades com GD é proposto. Além de prover ao consumidor medição independente de consumo e geração, o sistema é capaz de realizar o acionamento remoto de cargas e informar ao consumidor problemas como: sobretensão, subtenção e falta de energia. O sistema é baseado no medidor PZEM-004T e no microcontrolador ESP32, que recebe os valores medidos e os envia para uma aplicação web, desenvolvida no framework Ruby on Rails, através do protocolo MQTT. Os dados são salvos em um banco de dados PostgreSQL e apresentados ao usuário em forma de gráficos e quadros informativos atualizados em tempo real.

II. SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto é explanado a seguir em três subseções: a Seção III-A apresenta o hardware utilizado e o mecanismo de transmissão de dados, enquanto a Seção III-B explica o protocolo MQTT e a estrutura de tópicos utilizada, e a Seção III-C finaliza explicando sobre a aplicação web proposta e desenvolvida pelos autores.

A. Hardware e Envio de Dados

De modo a realizar medições independentes, o medidor monofásico PZEM-004T da Peacefair foi utilizado. Nele tensão e corrente são medidos com precisão de 0,5%, segundo dados do fabricante [6]. Através desse, a frequência da rede, fator de potência, a energia consumida e a potência são determinados e enviados via Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). A fim de receber essa informação e enviar ao servidor um microcontrolador ESP32 foi utilizado. O ESP32 foi escolhido, basicamente, por possuir tecnologia WiFi e Bluetooth integradas, sendo assim ideal para esta aplicação, assim como para outras em Internet of Things (IoT).

Após receber cada medição, o ESP32 calcula o CRC16 de modo a evitar qualquer informação corrompida. Os dados referentes aos últimos 15 minutos são compilados então em uma única string, com cada medição separada por vírgula, e enviada ao broker MQTT através da conexão com a rede WiFi. Cada mensagem é identificada com um id único e com a data da medição. A estrutura típica de uma mensagem enviada ao broker é apresentada na Fig. 1.

215.6,	← Tensão
0.05,	← Corrente
4.8,	← Demanda
0.000,	← Consumo
60.0,	← Frequência
0.30,	← Fator de Potência
1,	← ID do dispositivo
2020-11-09 15:30:06	← Data e hora de envio

Figura 1: Formato da string enviada ao broker MQTT

A mensagem enviada informa a energia consumida/gerada, a máxima potência medida e a última medição de corrente, tensão, frequência e fator de potência durante o intervalo de 15 minutos. Esse intervalo foi escolhido por ser o adotado para o cálculo de máxima demanda no Brasil [7] e pela otimização dos recursos de armazenamento, contudo esse tempo pode ser alterado via hardware para intervalos a partir de 30 segundos, trazendo ao usuário maior ciência da flutuação nas medições.

De modo a garantir a conectividade do sistema, uma rotina checa a conexão com a rede WiFi e com o broker, caso alguma desconexão seja notada, os dados começam a ser armazenados na memória flash interna do ESP32, sendo enviados quando a conexão for restabelecida. Cerca de 1,3MB foram separados para esse propósito, de forma que até 22.413 medições com até 58 bytes cada podem ser armazenadas, uma autonomia de até 234 dias em caso de desconexão com a rede WiFi. Contudo, ao iniciar o funcionamento o sistema deve necessariamente se conectar a uma rede WiFi, de modo a atualizar o RTC (Real Time Clock) interno do ESP32 e informar ao usuário, via aplicação web, que está conectado.

Afim de reduzir custos optou-se por não incluir uma bateria de emergência. Dessa forma, o sistema não é capaz de operar

em caso de falta de energia, sendo realizada a reconexão com a rede WiFi após o retorno do fornecimento.

De modo que a energia consumida e gerada seja monitorada, dois sistemas compostos por um ESP32 e um PZEM-004T cada devem ser instalados, um na saída do inversor e outro no quadro de distribuição. O sistema utilizado para medir o consumo possui ainda uma rotina adicional, que ao receber o comando do usuário, realiza o acionamento remoto de cargas instaladas no quadro de distribuição. Para isso, um relé de estado sólido foi instalado nessa parte do sistema. A arquitetura do sistema proposto é apresentada na Fig. 2.

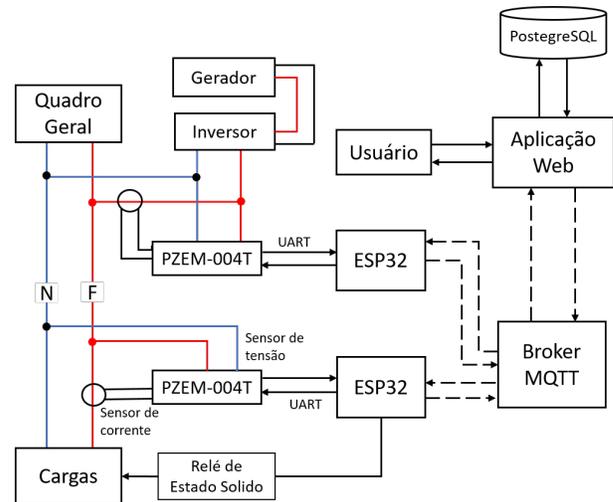


Figura 2: Arquitetura do Sistema Proposto

O sistema proposto suporta ainda unidades trifásicas, através do uso de três PZEM-004T, um para cada fase, conectados ao mesmo ESP32 através da porta serial. Contudo, o sistema é limitado pela tensão máxima de 260V do PZEM-004T, não sendo possível a instalação na média e alta tensão.

B. Protocolo MQTT

A maioria dos dispositivos utilizados em IoT são pequenos e limitados por capacidade de processamento e bateria [8]. Nesse cenário, protocolos de comunicação leves são requeridos de modo a otimizar o uso da rede e dar mais confiabilidade de informação, mesmo em conexões mais fracas. Protocolos como CoAP, MQTT e AMQP estão entre os mais utilizados em aplicações de IoT [9].

O protocolo MQTT é dito leve pela sua mensagem reduzida composta de basicamente três elementos: um header fixo, um header opcional variável e o payload. O protocolo é baseado na arquitetura publish/subscribe, composta basicamente por dispositivos conectados e pelo broker. Cada dispositivo pode publicar ou subscrever em um determinado tópico [10]. Uma vez que uma mensagem é publicada, o broker se encarrega de enviar a mensagem para todos os dispositivos subscreitos naquele tópico, sendo assim possível a troca de mensagens por milhões de dispositivos [9]. Outra vantagem do protocolo MQTT é a comunicação isolada através do broker, o que possibilita, além de outros recursos, a configuração do

mesmo para o envio de uma mensagem pré configurada a um determinado tópicos sempre que um dispositivo é desconectado, recurso conhecido com Will Message [11].

Neste trabalho o protocolo MQTT foi utilizado para o envio dos dados para a aplicação web. Cada dispositivo seja de geração ou consumo publica suas medições em um mesmo tópicos, chamado aqui genericamente de "measures", identificando-se através do id do dispositivo. A mensagem enviada a aplicação web através do broker MQTT é associada ao dispositivo que a enviou e salvo no banco de dados.

Da mesma forma, o acionamento remoto das cargas também é feito através de uma mensagem enviada pelo protocolo MQTT. Cada carga registrada tem um tópicos único, usado pela aplicação web para envio dos comandos de liga/desliga.

Finalmente, um tópicos chamado aqui genericamente de "last_will" é usado pelo broker para o envio da Will Message, informando quando um dos dispositivos se desconecta. A estrutura de tópicos utilizada é apresentada na Figura 3.

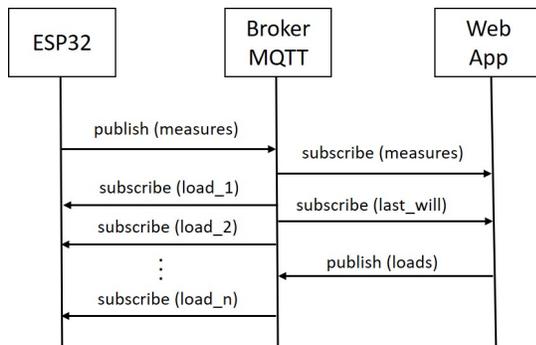


Figura 3: Estrutura de tópicos utilizada e fluxo da informação através do broker MQTT

C. Aplicação Web

Uma das desvantagens do protocolo MQTT é a não armazenagem de mensagens no broker. De modo a contornar esse problema, uma aplicação web foi desenvolvida para armazenagem e apresentação dos dados ao usuário.

A aplicação web foi desenvolvida utilizando o framework Ruby on Rails, baseado na linguagem de programação Ruby e na arquitetura Model-View-Controller (MVC). Assim que o servidor inicia, uma nova instância é criada para subscrever nos tópicos "last_will" e "measures". Essa instância passa a funcionar de forma secundária, sem interromper a instância principal, armazenando os dados recebidos no banco de dados e verificando se algum dispositivo foi desconectado. Cada mensagem recebida é associada com seu respectivo dispositivo através do número identificador presente na mensagem, ao passo que cada dispositivo é sinalizado no banco de dados como sendo de geração ou consumo. Essa prática garante a exibição correta dos dados ao usuário final.

Sempre que um dispositivo se desconecta, uma Will Message é recebida do broker e o status do dispositivo é alterado em tempo real para o usuário, além de um e-mail ser enviado, notificando-o a respeito.

As medições salvas no banco de dados são exibidas ao usuário usando gráficos atualizado também em tempo real e que podem ser visualizados por dia, semana, mês ou ano. Para o dispositivo de consumo o gráfico de consumo e máxima demanda registrada é exibido ao usuário, enquanto que no dispositivo de geração o gráfico de energia gerada e máxima potência do sistema.

Já o acionamento das cargas é realizado através da mudança de estado de switches presentes na aba Loads da aplicação. Quando acionado pelo usuário, uma mensagem é enviada para o tópicos específico daquela carga. No momento que o ESP32 recebe essa mensagem o estado da carga é alterado através do relé correspondente, e o último estado é salvo no banco de dados da aplicação. Dentro da aplicação os estados da carga são representados através de zeros e uns. Caso a carga já esteva acionada, uma mensagem "0" é enviada para o ESP32, caso contrario uma mensagem "1" é enviada.

De modo a garantir a privacidade de dados um sistema de usuários e autorização foi implementado, assim cada usuário tem acesso apenas as unidades autorizadas pelo administrador. Além disso, a aplicação web foi otimizada para ser utilizada tanto pelo computador como através de dispositivos móveis como tablets e celulares, possibilitando uma mobilidade do usuário no acesso e controle da sua unidade. O resultado obtido no desenvolvimento da aplicação web pode ser visto na Figura 4.

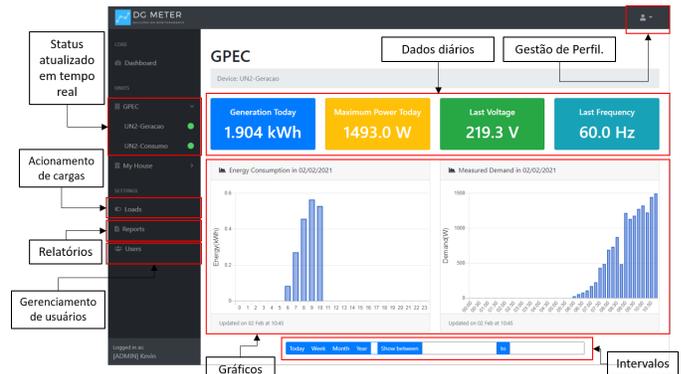


Figura 4: Vista da aplicação web desenvolvida

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De forma a avaliar a performance e operabilidade, o sistema proposto foi instalado no laboratório do Grupo de Processamento de Energia e Controle (GPEC-UFC). Lá foi monitorado o consumo de energia e a energia produzida por um sistema fotovoltaico presente no telhado. A unidade possui uma conexão trifásica com a rede, a partir do qual é dividida entre ar condicionados, bancadas e computadores. Já o sistema fotovoltaico é composto por 5 placas em série de 335Wp cada, formando uma potência de 1,675 kWp. Ao passo que a energia é injetada na rede através de um inversor monofásico de 1,5kW.

O consumo e a energia gerada foram monitorados pelo período de 5 dias, de 8 a 12 de Fevereiro de 2021. Para

demonstração, uma lâmpada de LED foi usada para testar a capacidade do controle de cargas.

Os dados monitorados durante o período de 5 dias são apresentados nas Fig. 6 e 7.

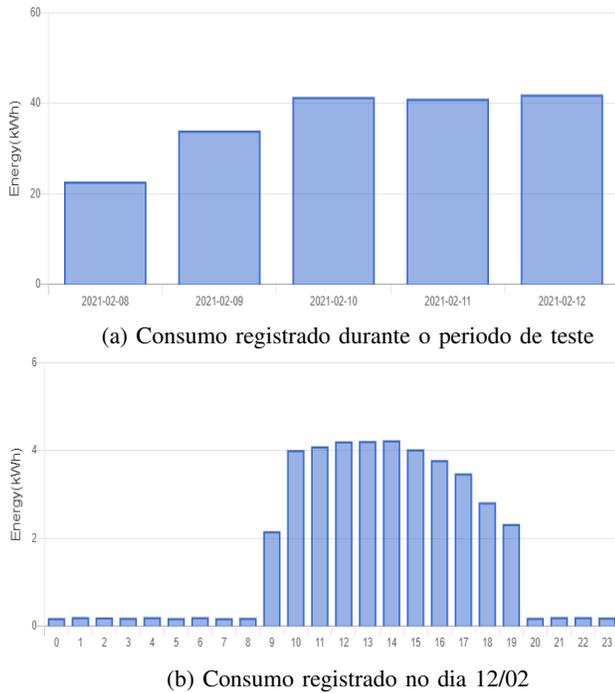


Figura 5: Consumo de energia total e detalhado do período de testes

A partir dos dados registrados, foi detectado um aumento na demanda da unidade no momento em que os pesquisadores chegam ao laboratório, normalmente entre 9h e 11h, e que se estende até o momento que vão embora entre 18h e 20h. Durante o intervalo que vai das 20h às 9h foi registrado consumo de energia durante todos os dias do estudo, o que indica que equipamentos são deixados ligados durante a noite, havendo assim desperdício de energia no momento em que não há ninguém na unidade.

Quanto à geração do sistema fotovoltaico, verificou-se no período das medições uma produção adequada do sistema para o período do ano. Apesar disso, a geração do sistema está muito abaixo do que é consumido na unidade, sendo necessário assim a ampliação do sistema para a compensação integral do que é consumido.

Já o sistema de acionamento foi validado através do acionamento remoto de uma lâmpada de LED, realizada pelo usuário em um horário oportuno através da aplicação web. A Figura 7 apresenta o horário em que o comando foi enviado e o subsequente acionamento da lâmpada através das medições de tensão e corrente.

Por último, a precisão do sistema de medição foi avaliada utilizando-se cargas conhecidas. Os resultados obtidos foram comparados com os do multímetro Fluke 177 True-RMS e são apresentados na Tabela I.

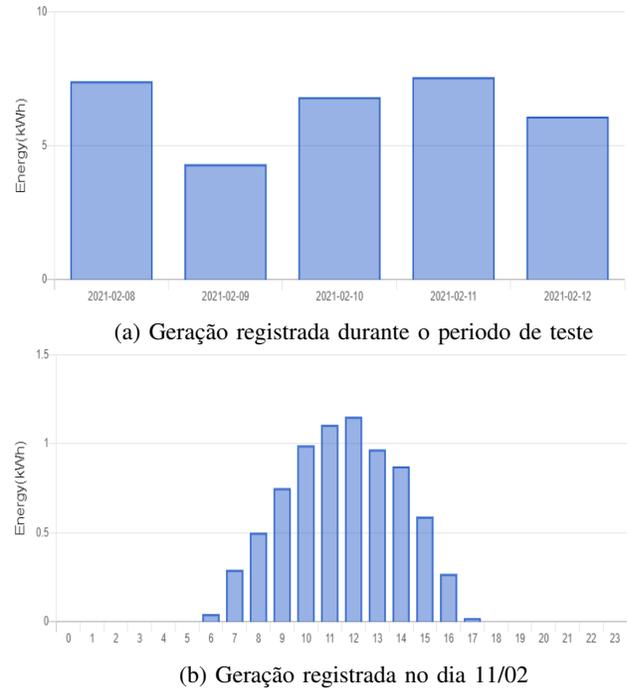


Figura 6: Geração de energia total e detalhada do período de testes

Tabela I: Comparação das medições obtidas pelo sistema de medição proposto e o multímetro Fluke 177

PZEM-004T			Fluke 177			Desvio
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	%
219.7	0.284	62.39	219.6	0.284	62.37	0.046
219.7	0.740	162.58	219.6	0.738	162.06	0.316
219.0	1.435	314.27	218.8	1.441	315.29	0.326
218.4	2.110	460.82	218.1	2.102	458.45	0.516
217.7	2.493	542.73	217.4	2.480	539.15	0.659
217.2	2.949	640.52	217.0	2.940	637.98	0.397

Através dos dados apresentados na Tabela I pode-se perceber que o grau de precisão obtido está dentro do limite de 5% estabelecido pelo fabricante na folha de dados do dispositivo, e que o sistema de medição, de modo geral, é capaz de apresentar dados precisos de consumo e geração ao prosumidor.

Além disso, pode-se perceber que o sistema apresenta vantagens pela simplicidade e baixo custo do hardware desenvolvido. O medidor monofásico possui um custo médio de US \$ 11 enquanto o trifásico de até US \$ 21, já incluindo o hardware necessário para acionamento de até duas cargas. Os custos com software se resume a hospedagem da aplicação web, que é variável dependendo do serviço contratado. Outro ponto a se destacar é a versatilidade do sistema, podendo ser instalado setorialmente, não se limitando assim a medição global da unidade.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um sistema de monitoramento e gerenciamento para unidades com geração distribuída de baixo custo. O protótipo instalado foi capaz de monitorar o consumo

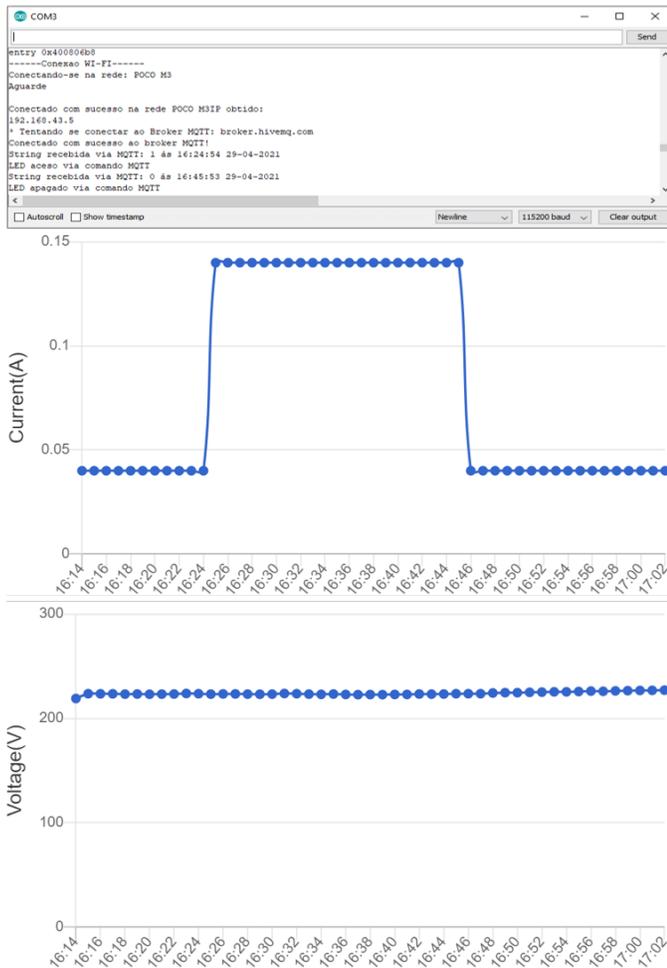


Figura 7: Gráfico de acionamento da lâmpada LED

e geração na unidade escolhida para teste e realizar o controle remoto de uma lâmpada de LED.

Além de garantir uma medição com precisão ótima de até 5% e operar em conexões com baixa velocidade, graças ao protocolo MQTT utilizado, o sistema proposto é capaz de proporcionar economia de energia, e melhoria no uso da energia produzida. Em indústrias, o sistema é capaz de auxiliar também no cálculo dos custos de produção relacionados a energia, proporcionando uma otimização de preço nessas unidades.

Futuras melhorias desse sistema incluem um mecanismo para ligamento/desligamento automático de cargas não prioritárias, seja em um horário programado, em caso de ultrapassagem na demanda, ou ultrapassagem de consumo. Planeja-se também a implementação de um calculador de tarifas amigável ao usuário, além de um sistema de encriptação de dados entre o broker MQTT e os usuários conectados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), sem este esse trabalho não seria possível,

e a Arthur Nunes pelo conhecimento repassado e suporte técnico.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. Geração distribuída. [Online]. Available at <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp> [Accessed 02 Feb. 2021].
- [2] ——. Geração distribuída. [Online]. Available at <http://bit.ly/power-bi-aneel> [Accessed 28 Jan. 2021].
- [3] ——. Resolução normativa nº 482/2012. [Online]. Available at <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> [Accessed 02 Feb. 2021].
- [4] ——. Nota técnica nº 0056/2017-srd/aneel. [Online]. Available at <https://bit.ly/3p8Lu8F> [Accessed 02 Feb. 2021].
- [5] A. J. D. Rathnayaka, V. M. Potdar, T. S. Dillon, O. K. Hussain, and E. Chang, "A methodology to find influential prosumers in prosumer community groups," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 1, pp. 706–713, 2014.
- [6] Peacefair. Pzem-004t v3.0 user manual. [Online]. Available at <https://bit.ly/3qc20G9> [Accessed 02 Feb. 2021].
- [7] ANEEL. Resolução normativa nº 414/2010. [Online]. Available at <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14486448/bren2010414.pdf> [Accessed 25 Abr. 2021].
- [8] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [9] S. Quincozes, T. Emilio, and J. Kazienko, "Mqtt protocol: Fundamentals, tools and future directions," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 09, pp. 1439–1448, 2019.
- [10] N. Shofa, A. Rakhmatsyah, and S. A. Karimah, "Infusion monitoring using wifi (802.11) through mqtt protocol," in *2017 5th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2017, pp. 1–7.
- [11] U. Hunkeler, H. L. Truong, and A. Stanford-Clark, "Mqtt-s — a publish/subscribe protocol for wireless sensor networks," in *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*, 2008, pp. 791–798.