

MEDIDOR DE CONSUMO DE ÁGUA E ENERGIA RESIDENCIAL COM MONITORAMENTO REMOTO¹

Gabriel Panema da Silva – gabriel.panema@gmail.com

Cristiano Akamine (Orientador) – cristiano.akamine@mackenzie.br

RESUMO

Em meio a crises hídricas e energéticas cada vez mais frequentes, torna-se fundamental a mudança nos hábitos de consumo por parte dos consumidores, inclusive em suas residências. Nesse cenário, este trabalho teve o objetivo de apresentar um sistema integrado de monitoramento remoto para consumo de água e energia elétrica residencial, utilizando um computador em placa única, ferramentas de previsão de séries temporais e análise de dados para alerta de anomalias. Além disso, com o objetivo de incentivar a utilização consciente dos recursos pelos consumidores residenciais, esta pesquisa apresentou uma comparação de tarifas para indicação de viabilidade para mudança de modalidade tarifária a partir do perfil de consumo. Na residência em estudo, onde foi instalado o sistema que utilizou um computador Raspberry Pi, foi possível monitorar a curva de demanda através do painel desenvolvido em Python. Além disso, o sistema foi capaz de projetar com precisão o consumo futuro da residência, através de dois modelos preditivos diferentes. A análise de anomalias permitiu a identificação de como o uso de alguns equipamentos consome energia de modo discrepante dos demais, além de alertar para um possível consumo indevido em períodos sem utilização. Por fim, foi possível identificar para a residência em estudo que o perfil de consumo torna viável a mudança de modalidade tarifária. Nesse cenário, concluiu-se que o sistema desenvolvido contribuiu através do atingimento de seu objetivo de criar um sistema integrado, incentivando o consumo consciente e abrindo caminhos para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Medições inteligentes. Computadores em placa única. Séries temporais.

RESIDENTIAL WATER AND ENERGY CONSUMPTION METER WITH REMOTE MONITORING

ABSTRACT

In the midst of increasingly frequent water and energy crises, it is essential that consumers change their consumption habits, including in their homes. In this scenario, this work aimed to present an integrated system for remote monitoring of residential water and energy consumption, using a single board computer, time series prediction tools and data analysis for anomaly alerts. Furthermore, with

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica, EE, UPM, São Paulo, 2021.

the objective of encouraging the conscious use of resources by residential consumers, this research presented a comparison of tariffs to indicate the viability of changing the tariff modality based on the consumption profile. In the residence under study, where the system that used a Raspberry Pi computer was installed, it was possible to monitor the demand curve through the panel developed in Python. In addition, the system was able to accurately project the future consumption of the residence through two different predictive models. The anomaly analysis allowed the identification of how the use of some equipment consumes energy in a discrepant way from the others, besides alerting to a possible improper consumption in periods of non-use. Finally, it was possible to identify for the residence under study that the consumption profile makes it feasible to change the tariff modality. In this scenario, it was concluded that the developed system contributed through the achievement of its objective of creating an integrated system, encouraging conscious consumption and opening paths for future work.

Keywords: Smart metering. Single board computers. Time series.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), os brasileiros consumiram, em média, 153,9 litros de água por dia em 2019. Esse valor é superior ao estabelecido como necessário pela Organização das Nações Unidas (ONU), de 110 litros por dia (SABESP, 2015). Aliado a esse consumo elevado, durante o processo de distribuição de água foram perdidos 39,2% da água potável disponibilizada no país em 2019 (SNIS, 2020).

No contexto do consumo de energia elétrica, segundo a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO, 2017), a participação do setor residencial no desperdício de energia elétrica entre 2014 e 2017 foi de 41,65%. Essa parcela do desperdício representava um potencial de economia de 27,46 bilhões de reais. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), entretanto, o consumo de energia elétrica nas residências brasileiras abrangia apenas 25,5% do consumo total do país em 2017, chegando a 26,1% em 2019, o que indica que há maior desperdício nesse setor em relação aos outros.

Uma alternativa para a redução de consumo em um cenário residencial é a utilização de métodos de apresentação gráfica. Esses métodos podem ser úteis para o acompanhamento, mostrando informações ao longo do tempo e dados instantâneos de consumo em tempo real. Segundo Oliveira (2019), a visualização dos dados permite a tomada de decisão e mudança de comportamento para diminuição de consumo.

No Brasil, entretanto, a medição do consumo de energia elétrica em quilowatt-hora (kWh) de uma residência é realizada mensalmente pelas concessionárias de energia. Não é possível, desse modo, identificar a como o consumo se distribui ao longo do mês ou horas do dia (ENEL, 2021).

Da mesma forma, segundo a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP, 2021), as empresas de saneamento de água e esgoto são responsáveis pelas medidas mensais de consumo de água. Assim, informações como a de qual período do dia tem mais consumo não são disponibilizadas ao consumidor final.

A adoção de redes inteligentes, no inglês *smart grids*, é uma alternativa interativa para a medição de consumo de energia elétrica (RIVERA et al., 2013). Além disso, o conceito de medições inteligentes, no inglês *smart metering*, possibilita a divisão do consumo de uma residência entre seus cômodos, a partir da adição de mais medidores, e a categorização do consumo ao longo de períodos do dia ou das estações do ano, com o uso de ferramentas de análise de dados (VIEGAS et al., 2016).

Utilizando um computador, é possível fazer o gerenciamento da aquisição dos dados através da programação dos sensores, armazenamento das informações obtidas em um banco de dados e apresentação gráfica das informações (DELLA ROVERE, 2016). Além da apresentação gráfica das medições passadas, métodos de previsão de séries temporais através de aprendizado de máquina podem ser utilizados para projetar o consumo de uma residência. As previsões são feitas partir dos dados adquiridos por sensores, de modo a refletir no futuro um comportamento passado, de acordo com o método escolhido (GROPPO et al., 2019). Desse modo, é possível incentivar a redução de consumo através da visualização de como serão os custos da residência no futuro.

Ademais, outros mecanismos podem ser utilizados para incentivar a redução do consumo. Um desses mecanismos é o incentivo financeiro para a redução de consumo em horários de maior utilização da rede pela população. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2015a), uma unidade consumidora de baixa tensão tem a possibilidade de escolher uma modalidade tarifária chamada Tarifa Branca, diferente da modalidade convencional.

A Tarifa Branca tem custos diferentes pela energia consumida em horários do dia definidos pelas distribuidoras. Desse modo, o consumidor pode optar por mudar sua modalidade tarifária caso seu perfil de consumo seja compatível, ou seja, caso consuma menos em horários de ponta e tenha maior consumo em horários fora de ponta. Essa possibilidade de mudança tarifária demonstra a utilidade do monitoramento do consumo de energia elétrica, principalmente categorizado em diferentes períodos do dia, pois esse monitoramento pode indicar ao consumidor qual é o seu perfil de consumo.

Nesse cenário, é possível encontrar na literatura estudos de protótipos (DINIZ *et al.*, 2017) e soluções comerciais prontas para monitoramento de consumo elétrico residencial, como revisado por Ferreira (2021, p.43). É possível, também, encontrar soluções análogas para o consumo de água (FILTSOFF e MARTINS, 2018; VENDEMIATTI, 2020).

Entretanto, não são muitas as soluções disponíveis que abarcam de modo integrado o consumo de água e energia elétrica. Além disso, protótipos retratados na literatura, como Pelegrin e Martins (2020), utilizam placas Arduino ao invés de computadores com sistema operacional e banco de dados.

Assim, se faz necessária uma pesquisa que integre o monitoramento existente em outras soluções encontradas na literatura com a utilização dos dados adquiridos em outras aplicações, o que torna possível o armazenamento e visualização dos dados, a previsão do consumo futuro e a identificação de possíveis anomalias.

Com essa perspectiva, o objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de um sistema para monitorar e prever o consumo de água e energia elétrica em uma residência. Os objetivos específicos deste trabalho foram o desenvolvimento do projeto do circuito elétrico para o sistema de monitoramento, criação do algoritmo de detecção de anomalias nos dados adquiridos, como possíveis vazamentos de água e fugas ou consumo indevido de energia elétrica, e indicar a viabilidade econômica da mudança de modalidade tarifária de energia elétrica para o consumidor, de modo a incentivar a redução do consumo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste trabalho, alguns pontos foram considerados importantes para fundamentar a implantação do protótipo proposto nesta pesquisa, como a revisão de soluções comerciais prontas para o monitoramento de consumo de energia, de modo a atender suas funcionalidades e tornar o produto final mais completo.

Além disso, é importante compreender o conceito dos computadores de placa única, com a utilização de sistemas operacionais de código aberto, que possibilitam o desenvolvimento de sistemas embarcáveis. Para a aquisição de dados, é importante entender o funcionamento dos sensores transformadores de corrente e de efeito Hall, além da utilização de aplicações como servidores locais, úteis para o armazenamento e apresentação dos dados. Por fim, compreender os métodos utilizados para projeção de séries é fundamental para o produto final desta pesquisa.

2.1 SOLUÇÕES COMERCIAIS

Algumas soluções comerciais prontas para medição de energia elétrica são achadas facilmente através de pesquisa em páginas *web* de fabricantes e podem ser consideradas como especificações para a funcionalidade de um protótipo de monitoramento remoto.

Um exemplo de solução pronta é a placa WATT METER JE05 da Bin Technology, baseada no módulo Wi-Fi ESP8266. Este módulo possibilita conexão sem fio pelos padrões 802.11b/g/n e permite a leitura das medidas de tensão, corrente, frequência e potência instantâneas, além de medidas acumuladas de energia (BIN TECHNOLOGY, 2017). As medições de corrente nas três entradas

analógicas de até 50mA da placa são realizadas através da ligação com sensores transformadores de corrente de 100A. As tensões são medidas através das três entradas analógicas de até 300Vac e as medições analógicas são convertidas por meio de um conversor analógico digital com resolução de 12bits.

Outro exemplo de solução pronta é a placa SM-2W Lite, da IE Tecnologia. A solução faz a leitura das grandezas de tensão de 90 a 250Vac e de corrente, por meio de transformadores de corrente de 100A. A solução conta com uma interface *web* para conexão, configuração e visualização das medições instantâneas em tempo real e dos cálculos de potência ativa, consumo em kWh e em reais, diário e mensal, com indicação gráfica (IE TECNOLOGIA, 2020).

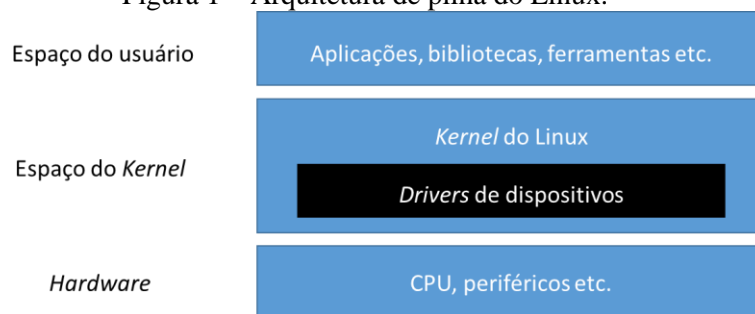
2.2 COMPUTADORES EM PLACA ÚNICA

Uma alternativa personalizável que permite maior liberdade para inclusão de funcionalidades que as soluções comerciais é a utilização de os computadores em placa única, em inglês *Single Board Computers* (SBC). Em meio à revolução causada pela internet das coisas, no inglês *internet of things* (IoT), os SBC ganharam espaço a partir de suas funcionalidades e praticidade. Segundo Johnston et al. (2016, p.141), SBC é uma classe de computadores completos miniaturizados, que contam, assim como dispositivos IoT construídos para tarefas específicas, com conexões para circuitos e sensores, rede, displays, e expansões por tecnologia de porta serial universal, em inglês *Universal Serial Bus* (USB).

Os SBC possibilitam a utilização de sistemas operacionais como o Linux, o que evita a necessidade de programação em linguagens de baixo nível, além de permitir a consulta das documentações dos Sistemas Operacionais (SO) durante o desenvolvimento de aplicações e a integração de protocolos e padrões de segurança.

Segundo Jones (2019), Linux é um sistema operacional de código aberto utilizado em computadores de diferentes capacidades de processamento, capaz de ser executado em diferentes arquiteturas de processadores. Na Figura 1 é possível observar a arquitetura de pilha do Linux, na qual o espaço do usuário conta com as aplicações e ferramentas que o usuário utiliza para manipular o sistema, o espaço do *kernel* contém o núcleo e os *drivers* dos dispositivos e o *hardware* abrange os periféricos conectados e a unidade central de processamento, do inglês *Central Processing Unit* (CPU).

Figura 1 – Arquitetura de pilha do Linux.



Fonte: adaptado de Jones (2019, p.1).

Segundo Jones (2019), a variedade de dispositivos e processadores suportados pelos SO derivados do núcleo do Linux, também chamados distribuições, é um dos motivos de sua popularidade. Além disso, por ser um SO de código aberto, é menos susceptível a ataques, à medida que é examinado por mais desenvolvedores, sendo, desse modo, mais seguro. Nesse cenário, as distribuições do Linux se tornaram comuns às soluções de internet das coisas.

2.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

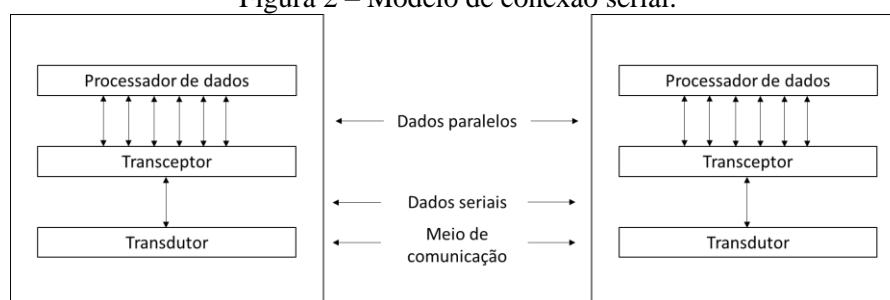
Para compreender a metodologia adotada no protótipo para aquisição de dados desta pesquisa, é importante revisar o conceito da comunicação serial, utilizada para conexão com sensores. Além disso, é importante revisar a teoria por trás do funcionamento de sensores de corrente e fluxo de água, nomeadamente os conceitos de sensores transformadores de corrente, conversão analógica-digital e sensores por efeito Hall.

2.3.1 Comunicação serial

Segundo Baldassin (2019, p.6), a comunicação serial é uma forma de comunicação entre o processador e dispositivos de entrada e saída onde é transmitido apenas um *bit* de informação por vez, havendo a necessidade de se converter para um modelo paralelo para serem processados.

A Figura 2 apresenta o modelo da conexão serial, no qual o transdutor é responsável por transformar os sinais do meio de comunicação em níveis lógicos para o transceptor, que, por sua vez, transmite e recebe dados seriais e converte em dados paralelos para o processamento.

Figura 2 – Modelo de conexão serial.

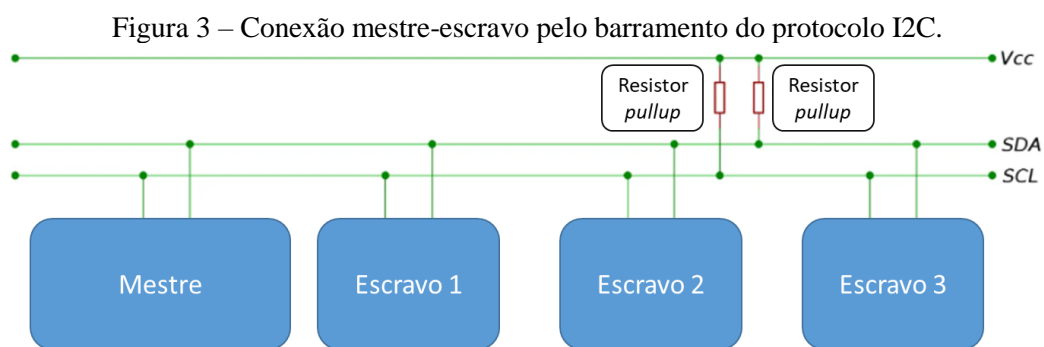


Fonte: adaptado de Baldassin (2019, p.7).

O protocolo de circuito inter-integrado, do inglês *Inter-Integrated Circuit* (I2C), é uma interface de comunicação serial síncrona, ou seja, conta com um pino de *clock* para sincronização. O protocolo é baseado na estrutura mestre-escravo, onde o dispositivo mestre solicita a transmissão ou recepção dos escravos.

Além disso, o I2C possibilita a existência de mais de um mestre, possibilitando que mais de um dispositivo controle a conexão com os periféricos. Segundo Yongdang *et al.* (2020, p.51804), todos os dispositivos conectados ao barramento possuem um endereço único, pelo qual são feitas as solicitações.

A Figura 3 contém a estrutura de conexão do protocolo I2C, onde é possível observar a ligação de um dispositivo mestre e dois dispositivos escravos através do barramento bidirecional de dados seriais, no inglês *serial data* (SDA), e de sincronização serial, no inglês *serial clock* (SCL). O sinal de *clock* é enviado junto aos dados, de modo que estes sejam lidos de forma sincronizada pelos receptores (ALMEIDA *et al.*, 2016, p.272).



Fonte: adaptado de Almeida *et al.* (2016, p.272).

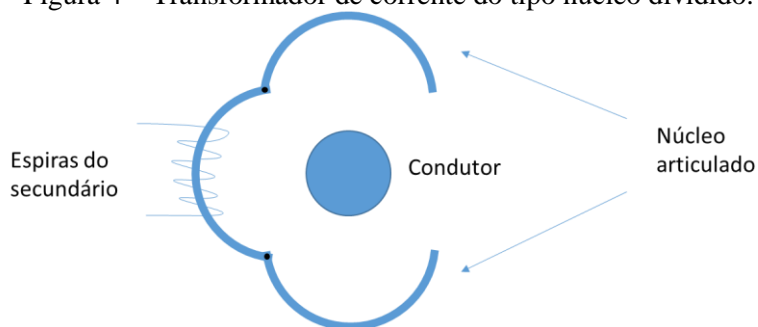
2.3.2 Sensores transformadores de corrente

Os sensores transformadores de corrente atuam com base no princípio da lei de indução de Faraday, que consiste em um campo magnético gerando um campo elétrico que produz uma corrente (HALLIDAY *et al.*, 2016).

Esse tipo de sensor é constituído de modo a realizar medições de corrente sem necessitar abrir o circuito, mas envolvendo o condutor com o sensor, que gera em seu secundário uma saída de corrente proporcionalmente menor à corrente original do primário, seguindo a relação de transformação relacionada ao número de suas espiras (MAMEDE FILHO, 2019, p.171).

A Figura 4 demonstra a forma construtiva do transformador de corrente do tipo núcleo dividido, usado na construção de sensores de corrente não invasivos. Nesse tipo de sensor, o condutor atua como enrolamento de primário e é envolvido pelo núcleo articulado.

Figura 4 – Transformador de corrente do tipo núcleo dividido.



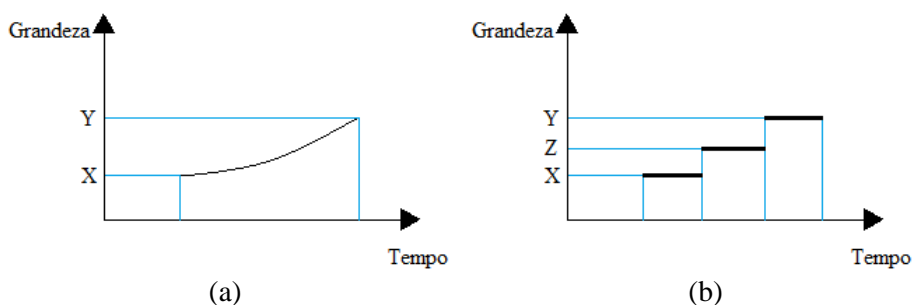
Fonte: adaptado de Mamede Filho (2019, p.175)

2.3.3 Conversão analógica-digital

Segundo Haupt e Dachi (2016, p.146), um conversor analógico digital, em inglês *analog-to-digital converter* (ADC), é um dispositivo utilizado para conversão dos sinais analógicos do mundo físico para os sinais digitais que podem ser processados pelos computadores. Os dados analógicos são aqueles que variam continuamente no tempo, como as grandezas físicas de corrente elétrica e tensão, enquanto os dados digitais são aqueles que variam discretamente no tempo, ou seja, os valores da grandeza digital variam dando saltos (CAPUANO e IDOETA, 2019).

É possível observar na Figura 5 como a grandeza física analógica passa continuamente por todos os pontos possíveis dentro de seu intervalo de atuação para chegar de um ponto a outro, enquanto a grandeza digital varia discretamente.

Figura 5 – Variação das grandezas: (a) analógica, (b) digital.



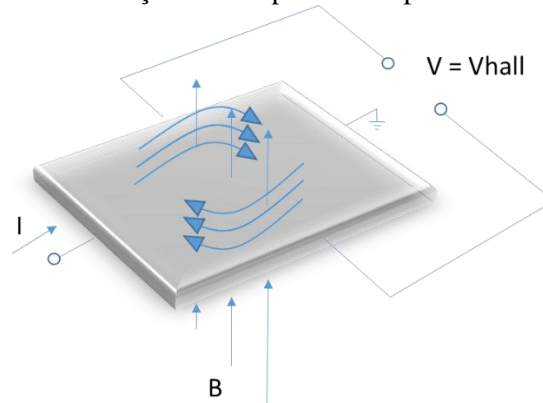
Fonte: adaptado de Capuano e Idoeta (2019, p.281).

2.3.4 Sensores de efeito Hall

O efeito Hall consiste no desvio na trajetória dos elétrons que percorrem um condutor em virtude da ação de um campo magnético no qual o condutor está inserido, possibilitando a verificação da carga positiva ou negativa dos portadores (HALLIDAY *et al.*, 2016). O desvio elétrons ocasiona a geração de um campo elétrico transversal que, para uma corrente mantida constante, é diretamente proporcional à intensidade do campo magnético, sendo da ordem de 20 a 30 microvolts para um campo magnético de 1 Gauss (AMPLOC, 2002, p.2).

A Figura 6 demonstra a geração da diferença de potencial V_{hall} a partir da inserção do condutor com corrente I no campo magnético B , representado pelas flechas verticais.

Figura 6 – Geração do campo elétrico por efeito Hall.

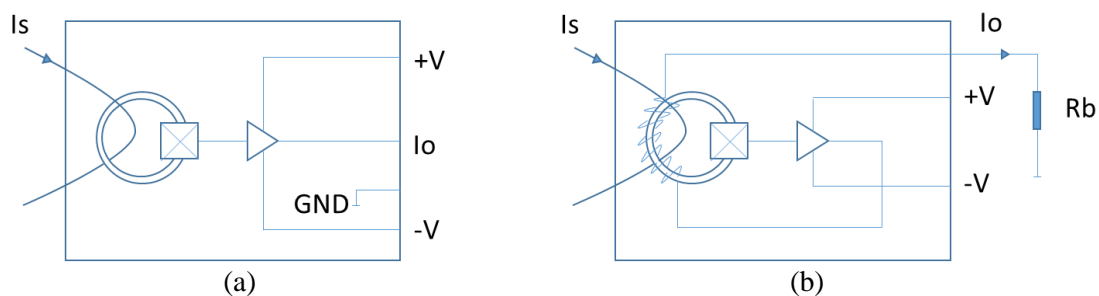


Fonte: adaptado de Amploc (2002, p.1).

O efeito Hall é utilizado como princípio de funcionamento de sensores, como os transdutores de corrente, que contam com o gerador Hall ligado à fenda de um núcleo magnético.

Os transdutores de corrente podem ser de laço aberto e fechado, como apresentado na Figura 7. No transdutor de laço aberto, o condutor transportando a corrente I_s passa em meio à toroide do núcleo magnético, que, conectado ao elemento Hall, tem o campo magnético gerado amplificado. O transdutor de laço fechado é constituído da mesma maneira, mas conta com a saída do elemento Hall enrolada no núcleo, de modo a produzir um campo magnético de mesma magnitude, mas com sinal oposto, garantindo o fluxo através do toroide próximo a zero. O transdutor de laço fechado apresenta também a saída como corrente, ao invés de tensão, necessitando a conversão por meio do uso de um resistor.

Figura 7 – Transdutor de corrente: (a) laço aberto, (b) laço fechado.



Fonte: adaptado de Amploc (2002, p.3).

2.4 SERVIDOR WEB LOCAL

Um método prático para armazenamento de dados adquiridos por sensores é a criação de um servidor *web* local. Esse tipo de servidor permite o desenvolvimento de páginas *web* sem a necessidade de conexão com a internet, através de ferramentas utilizadas para sua criação, como o

XAMPP, em computadores com sistemas operacionais Windows (SARAIVA e BARRETO, 2018, p.57-58).

Junto ao banco de dados MariaDB, baseado em MySQL, servidores locais podem contar com o aplicativo phpMyAdmin, página construída na linguagem PHP e utilizada para gerenciamento do banco de dados, permitindo a criação e manipulação de bases, tabelas e campos (SARAIVA e BARRETO, 2018, p.125). O phpMyAdmin é utilizado como base para aplicações *web* desenvolvidas em PHP (SARAIVA e BARRETO, 2018, p.143). Além disso, o banco de dados pode ser manipulado através de programas desenvolvidos em outras linguagens, como o Python.

2.5 SÉRIES TEMPORAIS

A partir de registros distribuídos ao longo do tempo e armazenados em um banco de dados, é possível analisá-los e projetar seu comportamento futuro através de séries temporais.

Segundo Morettin e Tolo (2018, p.1), séries temporais são conjuntos de dados observados e orientados ao longo do tempo. As séries temporais podem ser discretas ou contínuas, além de poderem ser construídas através de valores acumulados e agregados em intervalos de tempo iguais.

A análise de séries temporais é feita no campo de análise de dados para auxiliar na investigação dos motivos por trás da existência da série ou de algum comportamento específico. A análise pode ser feita também quando se busca por periodicidade específica na série ou para prever valores futuros com base nos dados recentes e passados (MORETTIN e TOLOI, 2018, p.3).

Segundo Ferreira e Duca (2018, p. 84), podem ser encontrados em séries temporais os comportamentos de tendência, sazonalidade e ciclo, além de resíduos aleatórios também chamados de erro. A tendência se caracteriza pelo padrão ascendente ou decrescente de uma série temporal. O componente da sazonalidade representa um comportamento repetido pela série temporal em um período dentro de um ano, como um comportamento mensal ou semanal. O ciclo, por sua vez, representa um padrão visto regularmente, mas, diferentemente da sazonalidade, não tem período fixo e acontece dentro de um período maior que um ano.

Uma série temporal pode ser representada por um modelo aditivo, ou seja, pela soma das componentes de sazonalidade, tendência, ciclo e erro. A representação também pode ser feita através de um modelo multiplicativo, formado pela multiplicação dos mesmos componentes (FERREIRA e DUCA, 2018, p.86).

Uma série temporal é considerada não estacionária quando apresenta componentes de tendência e sazonalidade. A estacionaridade é a característica representada por um movimento aleatório dos dados de uma série ao longo do tempo em torno de uma mesma média. Essa característica é assumida como uma condição verdadeira pelos modelos de análise de séries

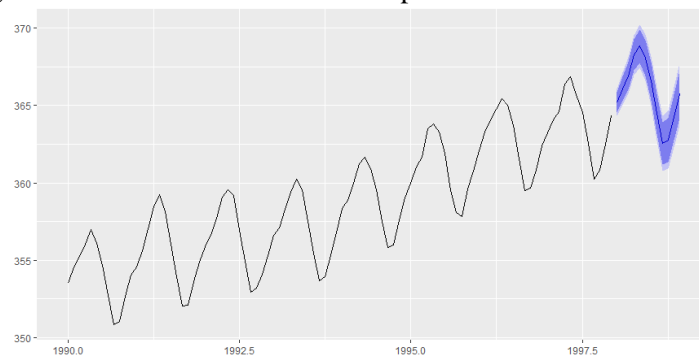
temporais. Desse modo, para realizar a análise de uma série temporal não estacionária é necessário realizar transformações nos dados (MORETTIN e TOLOI, 2018, p.5).

Uma família de modelos utilizada para previsão de séries temporais que se adapta a séries estacionárias ou não estacionárias é o conjunto de modelos autorregressivos integrados de médias móveis, no inglês *autorregressive integrated moving average* (ARIMA). Segundo Ferreira e Mattos (2018, p.129), o modelo ARIMA pode receber parâmetros de sazonalidade, sendo denominado SARIMA e definido pelos parâmetros p , d , q , P , D e Q , onde:

- a) p é igual à ordem do polinômio autorregressivo não sazonal;
- b) P é igual à ordem do polinômio autorregressivo sazonal;
- c) q é igual à ordem do polinômio de médias móveis não sazonal;
- d) Q é igual à ordem do polinômio de médias móveis sazonal;
- e) d é igual à ordem de diferença não sazonal;
- f) D é igual à ordem de diferença sazonal.

A Figura 8 representa a previsão de uma série temporal utilizando o modelo SARIMA(0,1,1)(0,1,1), ou seja, sem parâmetros autorregressivos. A projeção foi realizada para um horizonte de 12 meses, com intervalos de 95% e 99% de confiança. Os dados previstos seguem aderentes à tendência ascendente e à sazonalidade ao longo do ano apresentada pelos dados históricos.

Figura 8 – Previsão de uma série temporal com o método SARIMA.



Fonte: do autor

Para verificar a qualidade de uma previsão devem ser analisadas métricas de erro, baseadas nos próprios dados, utilizando uma parte da série temporal como treino para o modelo e outra como teste. Segundo Hyndman *et al.* (2021, p.5), algumas das principais métricas de erro analisadas são:

- a) Erro médio, no inglês *mean error* (ME);
- b) Raiz do erro quadrático médio, no inglês *root mean squared error* (RMSE);
- c) Erro absoluto médio, no inglês *mean absolute error* (MAE);
- d) Erro percentual médio, no inglês *mean percentage error* (MPE);
- e) Erro percentual absoluto médio, no inglês *mean absolute percentage error* (MAPE).

Linguagens de programação utilizadas para análise de dados, como Python e R, têm disponíveis bibliotecas e ferramentas específicas para análise de séries temporais. A biblioteca *forecast* do R, utilizada para previsões, tem a função *auto.arima* que define os melhores parâmetros a serem utilizados para cada modelo, com base na aderência do modelo preditivo aos dados (HYNDMAN *et al.*, 2021, p.14). Em Python, a biblioteca *pmdarima* (SMITH, 2017) apresenta a mesma funcionalidade.

Existem outras bibliotecas que utilizam aprendizado de máquina para realizar as previsões, como a biblioteca *prophet*. Esta biblioteca é mais aderente a séries com alta sazonalidade e um grande histórico de dados (FACEBOOK, 2017).

Além da previsão a partir do comportamento dos dados da série temporal, tais dados permitem a realização de análises a respeito do comportamento da própria série. Segundo Schiezero (2020), é possível identificar anomalias no comportamento dos dados através do treinamento de um modelo de inteligência artificial. O treinamento do modelo visa definir qual é o comportamento normal da série, de modo a considerar anormais os dados futuros que fugirem do padrão.

Além disso, segundo Agresti e Finlay (2012, p.73) é possível utilizar o método do *escore-z*, no inglês *z-score*, para identificar dados anormais. Utilizando esse método, todos os dados da série analisada que estiverem a mais de três desvios-padrão da média podem ser considerados como atípicos.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema desta pesquisa foi dividida em diferentes etapas. Cada etapa foi direcionada a uma funcionalidade do produto final, visando atingir todos os objetivos específicos da pesquisa.

A primeira etapa foi direcionada ao desenvolvimento do sistema de monitoramento. A etapa consistiu na configuração do sistema operacional, criação do servidor *web* local, modelagem do banco de dados e desenvolvimento dos códigos para aquisição dos dados de corrente elétrica e fluxo de água.

Para tanto, foi instalado o sistema operacional Raspberry Pi OS no SBC Raspberry Pi 4 Model B. O Raspberry Pi OS é o SO de 32 bits, baseado na distribuição Debian do Linux, para uso geral desenvolvido e recomendado pela Raspberry Pi Foundation para seus computadores. A instalação do SO foi feita através de um aplicativo para computador disponibilizado pela fabricante em sua página oficial na internet e um cartão de memória de 32GB. O Raspberry Pi OS traz consigo aplicativos já instalados que podem ser utilizados para IoT, como pacotes da linguagem de programação Python (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2014, 2020).

A placa escolhida para o desenvolvimento do sistema, o computador da linha Raspberry Pi, da Raspberry Pi Foundation, Raspberry Pi 4 Model B, conta com 2GB de memória DDR4 RAM, processador de Cortex-A72 de quatro núcleos e 64 bits (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2019). A placa apresenta conexão *Wi-Fi*, *Bluetooth* 5.0, 2 conexões USB 3.0, 2 conexões USB 2.0 e saída por tecnologia de interface multimídia de alta definição, em inglês *High-Definition Multimedia Interface* (HDMI).

Seguindo a metodologia proposta pela Raspberry Pi Foundation (2015), a partir da instalação do sistema operacional, foi habilitada a conexão I2C da placa, utilizando o comando `raspi-config` no terminal da Raspberry Pi, que acessa as configurações do SBC.

Após as configurações iniciais, foi realizada a implantação de um servidor *web* local a fim de utilizá-lo na etapa de aquisição dos dados. A configuração do servidor consistiu na instalação do Apache, PHP, MariaDB e phpMyAdmin, seguindo a metodologia proposta por Raspberry Pi FR (2019, p.1).

Utilizando a linguagem MySQL e o banco de dados do servidor local criado, foram modeladas as tabelas para armazenamento dos dados de medições, previsões, análise de anomalias e comparação de tarifas. Foram criadas diferentes agregações para os dados adquiridos, de modo a permitir a apresentação em diferentes dimensões de tempo na etapa de visualização dos dados. Para as tabelas de tarifas de energia elétrica, foram utilizadas as bases de postos tarifários e ranking de tarifas disponibilizadas pela ANEEL (2015b, 2015c).

O protótipo do medidor de consumo de energia elétrica foi desenvolvido em uma *protoboard* para testes dos sensores, com base no circuito proposto por Cabral (2019). O sensor utilizado foi o transformador de corrente SCT-013-000, da YHDC. Para sua utilização em conjunto à Raspberry Pi foi utilizado o ADC modelo ADS 1115, de 16 bits, que se conecta ao SBC através dos pinos SDA e SCL do protocolo I2C.

O circuito para medição de consumo de água, por sua vez, foi implementado com o sensor de fluxo de água por efeito Hall YF-S201, da YIFA. O sensor permite a medição dos litros de água que passam em seu interior por meio do envio de pulsos. O sensor atua com pressão máxima da água de 1,75Mpa, com fluxo na faixa de até 30 litros por minuto em um diâmetro de 1/2". Para conectar a saída de 5V do sensor aos conectores da Raspberry, que têm tensão máxima de entrada de 3,3V, foi utilizado um divisor de tensão por resistores.

Para aquisição dos dados dos sensores, foram desenvolvidos códigos na linguagem Python. O algoritmo para medição de consumo de energia elétrica foi construído com base na biblioteca `Adafruit_CircuitPython_ADS1x15` (ADAFRUIT, 2017), responsável por simplificar a programação do conversor analógico-digital. Por sua vez, o algoritmo de medição de consumo de água foi

construído a partir da biblioteca RPi.GPIO (CROSTON, 2021), utilizada para manipulação dos GPIO da Raspberry Pi.

O armazenamento dos dados adquiridos pelos sensores foi feito através da biblioteca mysql.connector (ORACLE, 2021), que permite acesso ao banco de dados MySQL pelo algoritmo em Python. A biblioteca também foi utilizada para realizar a inserção das previsões e da detecção de anomalias. As previsões foram desenvolvidas utilizando as bibliotecas pmdarima e prophet. A análise de anomalias, por sua vez, foi desenvolvida através do método do score-z.

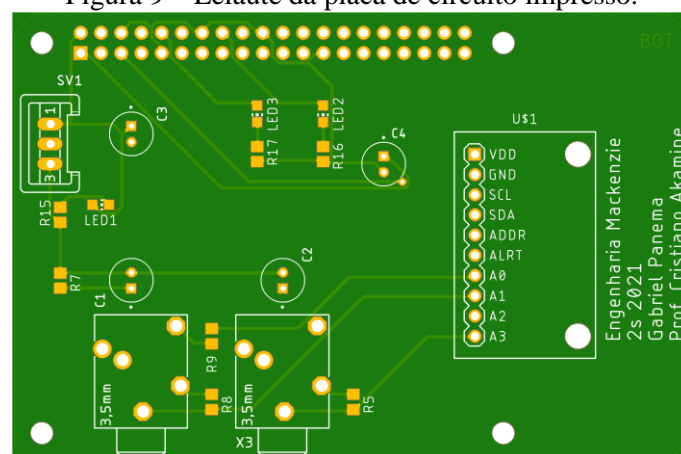
A comparação de tarifas foi desenvolvida no banco de dados, em MySQL, e agrupada por distribuidora. Esse agrupamento possibilita a comparação das tarifas convencional e branca em cada uma das distribuidoras da base de tarifas da ANEEL, de modo que o usuário do sistema possa fazer as comparações de acordo com a empresa que fornece energia para sua residência.

A apresentação gráfica dos dados adquiridos, previsões, detecções de anomalias e comparação de tarifas foi realizada utilizando a biblioteca dash (PARMER, 2021). A biblioteca utilizada em Python permite a atualização da página *web* em intervalos de tempo determinados, de modo a mostrar as informações atualizadas do banco de dados.

A etapa de aquisição dos dados para validação do sistema de medição de consumo de energia elétrica foi realizada com o protótipo desenvolvido a partir dos componentes soldados entre si. As aquisições foram realizadas na residência do autor, durante cinco dias consecutivos, através do sensor conectado a uma das fases do quadro de distribuição de energia elétrica da residência. Os periféricos do SBC foram desativados a fim de evitar interferências nas medições.

Também foi desenvolvido o leiaute do sistema em uma placa de circuito impresso, como apresentado na Figura 9. A placa foi projetada para ser utilizada como escudo na Raspberry Pi na versão final do produto da pesquisa.

Figura 9 – Leiaute da placa de circuito impresso.



Fonte: do autor.

A validação do circuito de monitoramento de consumo de água foi realizada por meio de teste de bancada, de modo a comparar as medições do sistema com volumes conhecidos.

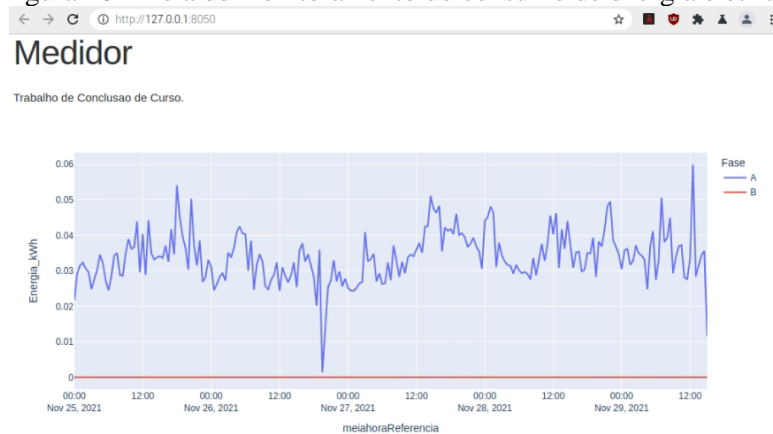
Após a aquisição dos dados de consumo de energia elétrica, estes foram exportados e analisados separadamente utilizando a linguagem R, de modo a possibilitar sua validação e discussão. Foi analisada a precisão dos modelos de previsão e foram tabuladas as anomalias encontradas pelo modelo e a comparação entre as tarifas de energia elétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a metodologia apresentada, foi possível obter um sistema que realiza a medição de corrente e fluxo de água a cada dez segundos e insere as informações obtidas no banco de dados. O sistema desenvolvido também realiza as projeções dos dados futuros em intervalos de tempo definidos, assim como a definição de pontos anômalos na série e a comparação das tarifas de energia elétrica.

Os dados de energia elétrica obtidos possibilitaram a construção do gráfico presente na Figura 10, que apresenta a tela do painel alocado no servidor local desenvolvido em Python. O gráfico demonstra como a curva de demanda da residência em estudo se comportou durante o período de medições. A energia consumida é distribuída no painel em intervalos de trinta minutos. É possível observar que o sistema é capaz de medir os diferentes níveis de consumo ao longo do dia.

Figura 10 – Tela de monitoramento do consumo de energia elétrica.



Fonte: do autor.

Durante o período de medições, a aquisição de dados foi interrompida em virtude de duas interrupções no fornecimento de energia elétrica da residência em estudo. As interrupções ocorreram durante o segundo e o quinto dia de monitoramento. O sistema foi capaz de reiniciar a aquisição de dados assim que o fornecimento de energia elétrica foi reestabelecido, em virtude de sua implantação com o serviço do Linux.

Analisando as previsões de consumo realizadas após o terceiro dia de medições, foi possível construir a Tabela 1, que compara as projeções dos dois modelos utilizados com os dados adquiridos

nos dois dias seguintes. Visando os erros com menores módulos, é possível constatar que, para o período das medições, o modelo prophet foi mais preciso que o modelo ARIMA com dados escolhidos automaticamente.

Tabela 1 – Comparação dos valores projetados.

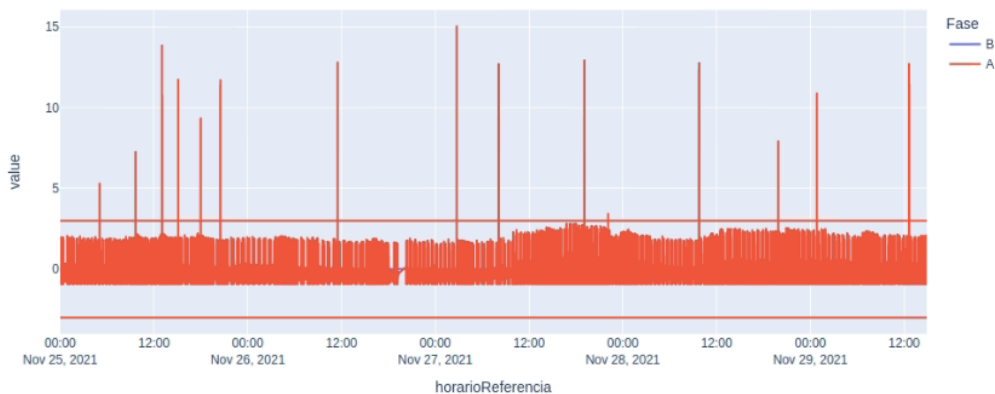
Métricas de erro	Modelo ARIMA	Modelo prophet
ME	-0,105	0,020
RMSE	0,260	0,101
MAE	0,238	0,099
MPE	-8,414	1,113
MAPE	16,213	5,938

Fonte: do autor.

É possível, nesse cenário, constatar que o sistema é funcional ao possibilitar a visualização de uma projeção que respeita os dados passados. No entanto, ressalta-se que para uma projeção realmente acurada, é necessário maior tempo de monitoramento e mais dados obtidos.

Analisando o gráfico de anomalias apontadas pelo algoritmo do sistema, foi possível identificar que quinze pontos ficaram acima do limite superior de normalidade dos dados. Esses pontos, visíveis na Figura 11, indicam que nos respectivos horários das medições houve picos de corrente incomuns aos demais horários.

Figura 11 – Curva do escore-z para detecção de anomalias no consumo de energia elétrica



Fonte: do autor.

O algoritmo considerou como anomalia no consumo a utilização de equipamentos como o forno de micro-ondas e o chuveiro elétrico da residência, em virtude de seu elevado consumo. Ademais, o sistema foi capaz de identificar no intervalo entre 2h e 5h, no acumulado do período de monitoramento, um consumo equivalente a 12,05% do consumo da residência nos dias monitorados, o que pode indicar um consumo excessivo pelos equipamentos enquanto não há pessoas os utilizando.

A grande quantidade de pontos na curva do gráfico de anomalias impossibilitou a análise clara dos pontos que fogem menos do padrão, apenas daqueles que passam do limite superior de controle. Nesse cenário, foi possível analisar anomalias no consumo causadas por utilização em excesso de

equipamentos ou de equipamentos com alta demanda, mas não foi possível identificar anomalias como fugas de corrente, como planejado. Desse modo, considera-se que a ferramenta não atingiu plenamente o intuito projetado, trazendo apenas uma parcela dos resultados esperados para a análise de anomalias.

Por fim, comparando as modalidades tarifárias para os dados armazenados, foi possível observar que, para o perfil de consumo da residência do estudo, a mudança para tarifa branca apresenta economia para o consumidor em todas as distribuidoras. A menor variação foi encontrada para a distribuidora Coprel, com 9,73% de redução na tarifa. A maior variação se deu para a Certrel, com 37,95% de redução. Para a Enel SP, do estado de São Paulo, a redução na tarifa foi de 16,04%. Desse modo, constata-se que o sistema é capaz de indicar a viabilidade econômica da mudança de modalidade tarifária na residência em estudo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados alcançados, é possível constatar que o sistema atingiu o objetivo de ser uma solução integrada para monitoramento, previsão e análise de anomalias de consumo, além da indicação da viabilidade econômica da mudança de modalidade tarifária.

Os resultados mostraram como o sistema desenvolvido é capaz de representar uma porta de entrada para mudanças de hábito, a partir da observação do consumo futuro da residência. Além disso, a indicação da viabilidade da mudança de modalidade tarifária se mostrou como uma importante ferramenta para o consumidor residencial, visto que apenas com o monitoramento realizado na residência em estudo que se tornou possível identificar que o perfil de consumo condizia com a mudança.

Conclui-se, desse modo, que este trabalho desempenhou uma importante contribuição para a literatura como um guia para as possibilidades de integração de diferentes conceitos de análise de dados ao monitoramento remoto do consumo residencial, com o objetivo de incentivar a redução de consumo, principalmente em períodos de crises energéticas.

Para estudos futuros, considera-se um próximo passo a utilização de mais sensores para possibilitar o monitoramento discriminado de cada cômodo, à medida que o banco de dados foi modelado para permitir a adição de sensores. Isso pode ser feito através de mais sensores conectados ao SBC, quando possível, ou através de sensores com conexão *wi-fi* para monitoramento à distância.

Para tanto, considera-se necessária a utilização futura de sensores de corrente com menor valor nominal, de modo que seja possível maior precisão na medição de circuitos que alimentam cargas menores e maior sensibilidade às possíveis anomalias.

Aliado a isso, propõe-se o uso de métodos de inteligência artificial e análise de dados para identificar quais os equipamentos sendo utilizados, de modo a, através do treinamento, possibilitar a

definição do comportamento normal de cada um deles ao invés de sempre considerar como anômalo quando comparado a outros equipamentos.

Por fim, para a utilização do sistema para o monitoramento do consumo de água, percebe-se necessária a utilização de uma bateria acoplada ao sistema, com o objetivo de evitar a suspensão do monitoramento causada pela interrupção no fornecimento de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ABESCO. **Desperdício de energia atinge R\$ 61,7 bi em três anos**. São Paulo, 22 mai. 2017.

Abesco. Disponível em: <http://www.abesco.com.br/novidade/desperdicio-de-energia-atinge-r-617-bi-em-tres-anos/>. Acesso em: 15 mai. 2021.

ADAFRUIT. **Adafruit_CircuitPython_ADS1x15**. 2017. Disponível em:

https://github.com/adafruit/Adafruit_CircuitPython_ADS1x15. Acesso em: 30 ago. 2021.

AGRESTI, A.; FINLAY, B. **Métodos Estatísticos para as Ciências Sociais**. 4. ed. Porto Alegre: Penso, 2012. 9788563899651. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788563899651/>. Acesso em: 21 Nov 2021

ALMEIDA, R. D. *et al.* **Programação de Sistemas Embarcados - Desenvolvendo Software para Microcontroladores em Linguagem C**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. 9788595156371.

Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595156371/>. Acesso em: 21 Nov 2021

AMPLOC. **AMPLOC *current sensors: engineer's reference handbook***. [S.l.], 2002. Disponível

em: https://docuri.com/download/internet-handbook_59c1d2eef581710b28651658_pdf. Acesso em: 4 abr. 2021.

ANEEL. **Tarifa branca**. Brasília, 24 nov. 2015. Aneel. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>. Acesso em: 31 ago. 2021.

ANEEL. **Postos tarifários**. Brasília, 24 nov. 2015. Aneel. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>. Acesso em: 31 ago. 2021.

ANEEL. **Ranking das tarifas**. Brasília, 24 nov. 2015. Aneel. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 31 ago. 2021.

BALDASSIN, A. **Comunicação serial (UART)**. [S.l.], 2019. 28 slides. Disponível em:

<http://www.rc.unesp.br/igce/demac/alex/disciplinas/MicroII/EMA864315-Serial.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2021.

BIN TECHNOLOGY. **WATT METER JE05 – Rev 03.00**. [S.l.], 29 nov. 2017. Bin Technology.

Disponível em: <https://www.bintechnology.com.br/wattmeterje05>. Acesso em: 16 mar. 2021.

CABRAL, J. E. **SCT 013 esquema**. 2019. 1 imagem. Disponível em:

https://www.mediafire.com/view/ukqgn3e2avwx81p/SCT013_esquema.jpg/file. Acesso em: 26 set. 2021.

CAPUANO, F. G; IDOETA, I. V. **Elementos de eletrônica digital**. 42. ed. São Paulo: Érica, 2019. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536530390/>. Acesso em: 15 mai. 2021.

CROSTON, B. **raspberry-gpio-python**. 2021. Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/raspberry-gpio-python/>. Acesso em: 7 nov. 2021.

DELLA ROVERE, Rodrigo Lisbôa. **Protótipo de um sistema inteligente de monitoramento do consumo de energia elétrica de uma residência**. 2016. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-31012017-121929/?&lang=br>. Acesso em: 15 mai. 2021.

DINIZ, B. R. A. *et al.* Projeto e desenvolvimento de um medidor de digital de energia elétrica monofásico para aplicações residenciais. **HOLOS**, [S.l.], v. 7, p. 55-68, dez. 2017. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5118>>. Acesso em: 21 nov. 2021. doi:<https://doi.org/10.15628/holos.2017.5118>.

ENEL. **Conheça sua conta de energia e boletos emitidos para o pagamento**. São Paulo, 23 jan. 2021. Enel. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para_Voce/entenda_sua_conta.html. Acesso em: 15 mai. 2021.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2020**: ano base 2019. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 15 mai. 2021.

FACEBOOK. **Prophet: forecasting at scale**. [S.l.], 23 fev. 2017. Facebook Github. Disponível em: <https://facebook.github.io/prophet/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

FERREIRA, Josiane Bezerra. **Análise de Formas de Medição de Consumo de Energia Elétrica no Setor Residencial**. 2012. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://www.cin.ufpe.br/~tg/2012-1/jbf2.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2021.

FERREIRA, P. G. C.; DUCA, V. E. L. D. A. Modelos de suavização exponencial. In: FERREIRA, P. G. C. (org.). **Análise de séries temporais em R**: curso introdutório. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. cap. 2, p. 84-102. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154902/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

FERREIRA, P. G. C.; MATTOS, D. M. D. Modelos SARIMA. In: FERREIRA, P. G. C. (org.). **Análise de séries temporais em R**: curso introdutório. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. cap. 4, p. 129-150. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154902/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

FILTSOFF, Ricardo Barros; MARTINS, Daves Márcio Silva. Sistema de monitoramento e controle do consumo de água residencial. **Caderno de Estudos em Sistemas de Informação**, Juiz de Fora, MG, v. 5, n. 2, n.p., 2018. Disponível em: <https://seer.cesjf.br/index.php/cesi/article/view/1633>. Acesso em: 21 nov. 2021.

GROPPO, Gustavo de Souza *et al.* *Predicting water demand: a review of the methods employed and future possibilities*. **Water Supply**, [S.l.], v. 19, n. 8, p. 2179-2198, 29 ago. 2019. IWA

Publishing. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/19/8/2179/69623/Predicting-water-demand-a-review-of-the-methods>. Acesso em: 16 mai. 2021.

HALLIDAY, David *et al.* **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. Tradução de Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 3, 2016. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521632092>. Acesso em: 4 abr. 2021.

HAUPT, Alexandre; DACHI, Édison. **Eletrônica digital**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2016. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/158767>. Acesso em: 15 mai. 2021.

RASPERRY PI FR. **How to install a web server on the Raspberry Pi (Apache + PHP + MySQL)**. [S.l.], 29 ago. 2019. How to Raspberry Pi. Disponível em: <https://howtorasperrypi.com/how-to-install-web-server-raspberry-pi-lamp/>. Acesso em: 2 mai. 2021.

HYNDMAN, R. *et al.* **Package 'forecast'**. [S.l.], 11 mar. 2021. CRAN. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2021.

IE TECNOLOGIA. **Medidor de energia bifásico wifi de baixo custo SM-2W Lite**. Itajubá, MG, 6 jul. 2020. IE Tecnologia. Disponível em: <https://ietecnologia.com/product/medidor-de-energia-bifasico-wifi-de-baixo-custo-sm-2w-lite/>. Acesso em: 4 abr. 2021.

JOHNSTON, S. J. *et al.* Applicability of commodity, low cost, single board computers for Internet of Things devices. In: IEEE WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS (WF-IOT), 3, 2016, Reston, Virgínia, Estados Unidos. **2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 141-146.

JONES, M. T. **Linux and IoT**. Mansfield, Texas, Estados Unidos, 13 dez. 2019. Mouser Electronics. Disponível em: <https://br.mouser.com/blog/blog/blog/linux-and-iot>. Acesso em: 20 abr. 2021.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2019. 9788521636434. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636434/>. Acesso em: 21 Nov 2021

MORETTIN, Pedro A.; TOLOI, Clélia M. C. **Análise de séries temporais: modelos lineares univariados**. 3. ed. São Paulo: Blucher, v. 1, 2018. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/164072>. Acesso em: 16 mai. 2021.

OLIVEIRA, Gabriel Lisboa Costa de. **Aplicação para controle do consumo elétrico: redução de custos através do monitoramento do consumo**. 2019. TCC (Graduação) - Curso de Sistemas de Informação, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/10984>. Acesso em: 15 mai. 2021.

ORACLE. **MySQL Connector: Python Developer Guide**. 2021. Disponível em: <https://dev.mysql.com/doc/connector-python/en/>. Acesso em: 9 out. 2021.

PARMER, C. **Dash Python User Guide**. 2021. Disponível em: <https://dash.plotly.com/>. Acesso em: 29 ago. 2021.

PELEGRIN, Matheus Chrispim; MARTINS, Paulo João. **Monitoramento de Consumo de Energia, Utilizando Arduino e Sensor de Tensão e Corrente Elétrica**. 2020. 17 f. TCC

(Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, SC, 2020. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/8848>. Acesso em: 21 nov. 2021.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Python**. [S.l.], 3 abr. 2014. Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/python/>. Acesso em: 19 abr. 2021.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **raspi-config**. [S.l.], 1 abr. 2015. Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/documentation/configuration/raspi-config.md>. Acesso em: 19 abr. 2021.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **GPIO**. [S.l.], 13 abr. 2018. Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>. Acesso em: 14 abr. 2021.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 4 Model B Specifications**. [S.l.], 24 jun. 2019. Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>. Acesso em: 13 abr. 2021.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi OS**. [S.l.], 12 nov. 2020. Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/software/>. Acesso em: 8 abr. 2021.

RIVERA, Ricardo *et al.* Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 40, p. 43-83, dez. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2927>. Acesso em: 15 mai. 2021.

SABESP. **Em casa**. São Paulo, 3 set. 2015. Sabesp. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=776>. Acesso em: 15 mai. 2021.

SABESP. **Entenda sua conta**. São Paulo, 6 abr. 2021. Sabesp. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=776>. Acesso em: 15 mai. 2021.

SARAIVA, Maurício de Oliveira; BARRETO, Jeanine dos Santos. **Desenvolvimento de sistemas com PHP**. 1. ed. Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595023222/>. Acesso em: 16 mai. 2021.

SCHIEZARO, M. **Como detectar anomalias utilizando inteligência artificial**. [S.l.], 21 jan. 2020. Venturus. <https://www.venturus.org.br/como-detectar-anomalias-utilizando-inteligencia-artificial/>. Acesso em: 22 mai. 2021.

SMITH, T. G. **pmdarima**: ARIMA estimators for Python. 2017. Disponível em: <http://alkaline-ml.com/pmdarima/>. Acesso em: 22 set. 2021.

SNIS. **25º diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2019**. Brasília, 2020. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2019/Diagn%C3%B3stico_SNIS_AE_2019_Republicacao_31032021.pdf. Acesso em: 15 mai. 2021.

VENDEMIATTI, Caíque. **Sistema remoto para monitoramento do consumo de água em tempo real**. 2020. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Sorocaba, SP, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/202358>. Acesso em: 21 nov. 2021.

VIEGAS, Joaquim L. *et al.* *Classification of new electricity customers based on surveys and smart metering data*. **Energy**, [S.l.], v. 107, p. 804-817, jul. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544216304789>. Acesso em: 15 mai. 2021.

YONGDANG, Chen *et al.* *Design of Multi-Line Elastic Belt Conveying Control System for Knitting Machine Based on I2C Protocol*. **IEEE Access**, [S.L.], v. 8, p. 51803-51809, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2020.2979627>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9028254>. Acesso em: 21 nov. 2021.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Presbiteriana Mackenzie, em conjunto com as plataformas Biblioteca Virtual e Minha Biblioteca, por permitirem que esse trabalho saísse da primeira página. Aos companheiros Patrick, Mateus e Ricardo, por me apresentarem ao mundo dos computadores de placa única, descobrirem comigo como trabalhar com servidores locais em Linux e me auxiliarem quando precisei de ferramentas.