

## Modelagem e Desenvolvimento de uma Solução de IoT e Gêmeo Digital para Medição de Consumo de Energia Residencial

Francisco Borges Carreiro\*. Júlia Ferreira Nascimento\*\*  
Guilherme Mateus Lopes Sousa\*\*\*

*\*Departamento de Eletroeletrônica, Instituto Federal do Maranhão, São Luís-MA,  
BRA (Tel: 303-555-5555; e-mail: fborges@ifma.edu.br).*

*\*\* Instituto Federal do Maranhão, São Luís-MA,  
BRA (e-mail: julia.nascimento@acad.ifma.edu.br)*

*\*\*\* Instituto Federal do Maranhão, São Luís-MA  
BRA, (e-mail: guilherme.sousa@acad.ifma.edu.br)*

---

**Abstract:** This work carries out a study that aims to obtain a residential energy consumption management solution based on industry 4.0 concepts and technologies, such as augmented reality and IoT, and the modeling of Digital Twins. This system enables the storage, monitoring and visualization of energy consumption data from an energy meter, having an energy meter device located in a residence in the city of Curitiba-PR. The proposed architecture was divided into three layers: hardware, cloud, and software, resulting from the combination of IoT and Digital Twins architecture modeling. The results are satisfactory, because with the solution obtained it became possible to manage the energy consumption of the residence in question, providing the consumer with the monitoring of their consumption online, enabling decision-making and insights (indications) for actions aiming at efficient consumption in the context of energy efficiency.

**Resumo:** Este trabalho realiza um estudo que visa a obtenção de uma solução de gestão do consumo energético residencial com base em conceitos e tecnologias da indústria 4.0, como a realidade aumentada e IoT, e a modelagem de gêmeos Digitais. Este sistema possibilita a armazenagem, monitoramento e visualização dos dados de consumo energético de um medidor de energia, tendo um aparelho de medição de energia localizado em uma residência na cidade de Curitiba-PR como objeto de estudo. A arquitetura proposta foi dividida em três camadas: hardware, nuvem e software, resultante da combinação das modelagens das arquiteturas de IoT e Gêmeos Digitais. Os resultados mostram-se satisfatórios uma vez que com a solução obtida tornou-se possível a gestão do consumo energético da residência em questão, dando ao consumidor o acompanhamento de seu consumo de forma online, o que possibilita a tomada de decisão e insights (indicações) para ações visando o consumo eficiente no contexto da eficiência energética.

*Keywords:* Internet of Things; Digital Twin; Energy Management.

*Palavras-chaves:* Internet das Coisas; Gêmeo Digital; Gerenciamento de energia.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, aborda conceitos e tecnologias capazes de levar um processo de fabricação industrial ao patamar de manufatura inteligente, permitindo que máquinas se integrem umas às outras digitalmente, trazendo consigo as inúmeras possibilidades de aplicação das tecnologias visando a digitalização de processos, como a Internet das Coisas (Internet of Things – IoT). Isso permite uma capacidade de visualização, prevenção de falhas e até de predição de dados, utilizando-se modernas tecnologias de simulação que se assemelham ao funcionamento real de dispositivos, máquinas e processos, como a dos Gêmeos Digitais. Estas tecnologias vêm trazendo diversos benefícios e possibilidades, como a capacidade de análise estatística, armazenagem histórica, visualização, otimização e até mesmo predição de fenômenos e condições em máquinas e processos. Estes benefícios têm levado vantagem competitiva a grandes indústrias, pois estas passam a ter capacidade de predição de falhas e otimização de processos, elevando a eficiência e reduzindo custos de forma padronizada.

Tais tecnologias têm sido aplicadas nas mais diversas áreas, entre elas a de gestão de consumo energético. Essa área vem sendo motivo de preocupação e objeto de estudo devido ao crescimento da demanda energética mundial que, entre os anos de 1971 e 2019, aumentou mais de 2,6 vezes (IEA, 2021). Quando se observa a problemática no contexto industrial, de posse das tecnologias da indústria 4.0 supracitadas, muitas indústrias já conseguem obter diversas vantagens da digitalização dos dados de consumo energético. Segundo Amaral, Brandão e Reis (2013) grande parte dos sistemas de gestão energética “também possibilitam facilidades para medidores de consumo de energia, gás e consumo de água. Os dados obtidos podem ser usados para realizar-se rotinas de autodiagnóstico e otimização e para produzir análises histórica de dados e ainda a previsão (*forecasting*) dos dados de consumo anual”.

De posse desses dados e das vantagens ocasionadas pela gestão de consumo energético, muitas indústrias já são capazes de otimizar sobremaneira seu consumo, realizando técnicas de modulação fabril, desligamento programado, entre outras (Fernandes, 2015). Contudo, quando se observa o cenário residencial, principalmente no Brasil, onde as residências são o segundo maior grupo consumidor (30%), sendo menor apenas que o industrial (35%), os dados de consumo energético são utilizados apenas para a cobrança mensal pelas concessionárias (Empresa de Pesquisa Energética, 2022).

Dessa forma, as medições são realizadas, os dados existem, mas não ficam disponíveis ao consumidor, tornando-o incapaz de tomar quaisquer medidas de contenção em caso de grande consumo energético, tendo em vista que este até sabe o quanto está consumindo durante o mês, mas não como. Ademais, em muitos casos, as residências possuem medidores de energia analógicos e antigos, dependendo de uma visita presencial do corpo técnico das concessionárias de energia para realização da medição (Arenas, 2019).

Assim, observa-se um grande potencial de benefícios não só na gestão, mas na otimização do consumo e eficiência energética das residências brasileiras caso o consumidor tenha acesso aos seus próprios dados de consumo. Nesse sentido, este artigo discute a implementação de uma solução de armazenagem, monitoramento, visualização e gestão dos dados de consumo energético na forma de um Gêmeo Digital de um medidor de energia elétrica residencial baseado numa arquitetura IoT, possibilitando a gestão de consumo residencial.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

Vários são os casos em que aplicações de IoT voltadas ao consumo energético alcançam resultados importantes no contexto de eficiência energética. Em alguns deles, os ganhos se apresentam na forma de apoio à decisão, ou seja, onde os dados são capazes de fornecer indicações e enriquecer a investigação, provendo gestão de consumo energético ao usuário.

Um bom exemplo do uso de tecnologias de extração e processamento de dados de consumo de energia é o proposto por Alulema, Zapata e Zapata (2018), onde, usando-se um sistema de monitoramento remoto de consumo energético e uma aplicação web, eles reforçam a capacidade de gestão de consumo energético que a IoT pode prover ao consumidor.

Bharati, Madhushree e Kumari (2017) afirmam que os dados de consumo energético ao alcance do consumidor doméstico podem reduzir este consumo de forma vultosa, “se nós pudermos monitorar nosso uso diário de energia e desligarmos eletrodomésticos que estão consumindo energia de maneira desnecessária”.

Úbeda, Moreno, Skarmeta e Zamora (2014), em seu trabalho voltado à eficiência energética em sistemas de refrigeração, ventilação e aquecimento, citam a importância dos dados para reduzir-se o consumo energético nesses sistemas e chegam ao importante percentual de redução de consumo energético possível de 23%.

Alonso, Hernan e Holger (2017) citam também as possibilidades de ganhos indiretos que os dados podem oferecer pelo simples fato de as pessoas conseguirem observar seu consumo energético em um menor período, como diariamente, diferente da tradicional “surpresa” ao final do mês. Realizando uma pesquisa em quinze domicílios diferentes, tomando uma amostra de 50 pessoas na faixa etária de 20 a 60 anos entre homens e mulheres da cidade de Arequipa (Peru), chegou-se à conclusão de que “a maioria das famílias entrevistadas não tomam consciência de seu consumo elétrico em suas casas, originando elevados custos em suas contas de luz e sobrecarga elétrica em alguns eletrodomésticos, ocasionando seu mau funcionamento”. Com efeito, de posse dos dados, os consumidores residenciais tendem a ter “um melhor controle do que se consome, ademais que o sistema permite a criação de alertas caso o consumo seja mais alto em comparação a outros dias. Assim, o usuário terá mais preocupação em economizar energia elétrica, bem como realizar manutenção em seus equipamentos.

Os ganhos aumentam ainda mais se aos dados forem aplicadas técnicas avançadas de análise, como algoritmos e técnicas de tratamento de dados. Diversos trabalhos de referência têm trazido bons resultados na área de Eficiência Energética por meio da aplicação de algoritmos capazes de otimizar o funcionamento de equipamentos, como ar-condicionados, a exemplo do proposto por Martínez, López-Morales e Skarmeta (2021), que apontou a capacidade de redução de consumo energético em 23% em um sistema de irrigação pela aplicação de Algoritmos Genéticos em dados adquiridos por IoT aplicada à medição de consumo energético. Ou o trabalho de Clausen, et al. (2021), que propôs uma estrutura de gêmeos digitais para melhorar a eficiência energética e o conforto dos ocupantes em edifícios públicos e comerciais em relação à temperatura do ambiente.

### 3. MODELAGENS IOT E GEMEO DIGITAL

#### 3.1 Arquiteturas IoT

A Internet das Coisas possui diferentes tipos de abordagem para construção de diferentes arquiteturas, sendo as mais comuns as que se baseiam em camadas (Masud, 2013). Inicialmente, a implementação levou em consideração 3 camadas, a saber (Wu et al. 2010):

- Percepção: camada física, abordando os sensores e dispositivos de campo, responsável pela tradução e coleta de informações do ambiente em que estão inseridos, geralmente transformando grandezas físicas, como pressão e umidade, em sinais digitais;
- Rede: responsável por conectar todos os dispositivos em um barramento, capaz de transportar informações baseadas em um ou mais protocolos de comunicação. Os dispositivos podem ser de camada física, como sensores, ou até mesmo de elevado grau de sofisticação, como computadores e servidores;
- Aplicação: responsável por serviços específicos voltados ao usuário final. Nela acontece a entrega de valor, onde as informações, transformadas por regras de transformação, agregação e armazenagem de dados para gerar informações, são visualizadas e disponibilizadas ao usuário. Tais aplicações possuem pequena, média e grande escala, entre elas: gestão de cidades inteligentes, automação residencial, monitoramento de saúde, entre outros.

Para Sarangi e Sethi (2017), a arquitetura de 3 camadas sumariza o conceito da Internet das Coisas, contudo há a necessidade de abordagens capazes de caracterizar aspectos mais específicos dela, uma vez que esta “define a ideia central da Internet das Coisas, mas não é suficiente para a pesquisa em IoT, pois a pesquisa necessita frequentemente focar em aspectos refinados da IoT”. Já Masud e Said (2013), afirmam que a arquitetura em três camadas, com a evolução da Internet das Coisas e de suas funcionalidades agregadas, torna-se “insuficiente tendo em vista o desenvolvimento esperado da IoT”. Desse modo, surgem mais arquiteturas, com mais camadas, capazes de identificar pontos mais específicos da Internet das Coisas, destacando-se a arquitetura baseada em cinco camadas, utilizada como referência neste trabalho.

As cinco camadas da arquitetura levam em consideração um maior cenário de possibilidades, sendo um complemento à arquitetura em 3 camadas, vista anteriormente. A esse contexto acrescentam-se as camadas de processamento e negócio:

- Negócio: gerencia as regras de negócio baseadas na IoT, contendo, portanto, análises de dados, automações, integrações a outros sistemas, transformação, agregação de dados e geração de gráficos. É onde se agrega valor aos dados refinados nas camadas anteriores.
- Processamento: realiza o tratamento de dados baseado em operações de armazenagem, transformação e análise de grandes quantidades de dados provenientes da camada de transporte, ou camada de rede. Pode gerir e suprir uma grande diversidade de aplicações e serviços pertencentes à camada de aplicação. Caracteriza-se por utilizar maior poder computacional, com tecnologias como bancos de dados, computação em nuvem, big data, entre outros.

A Fig. 1 ilustra as arquiteturas IoT de 3 e 5 camadas:

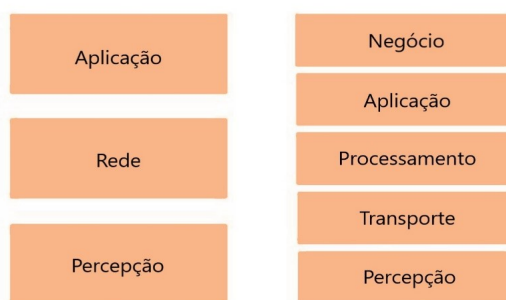


Fig. 1 Arquiteturas IoT em três e cinco camadas.(Sarangi e Sethi, 2017).

#### 3.2 Modelagem de Gêmeos Digitais

Gêmeos Digitais têm seu funcionamento fundado em dois aspectos importantes: comunicação e dados. A comunicação trata não só do transporte de dados, mas da garantia de resposta e ação em um tempo tolerável ao processo, disponibilidade de dispositivos e gerenciamento da integração destes, além da capacidade de, dependendo da aplicação, lidar com um grande volume de dados. Já os dados são importantes componentes, podendo ser processados, refinados e então entregar valor ao consumidor. Contudo, uma tecnologia que possui tamanha complexidade e camadas de aplicação, o que caracteriza uma verdadeira arquitetura, necessita de uma boa modelagem para ser aplicada de forma a gerar os melhores resultados (Silva, 2019).

A modelagem referência em Gêmeos Digitais é ainda mais recente à da IoT, uma vez que se trata de uma área de conhecimento mais nova e ainda em expansão, mas que, como visto anteriormente, possui grande potencial tendo em vista a emergência de assuntos relacionados ao metaverso (Chen et al. 2022). Para tanto, cita-se o trabalho de Parrot e Warshaw (2017), que afirmam que a modelagem de um Gêmeo Digital precisa passar pelas seguintes etapas:

- Criação: Envolve o levantamento das métricas críticas do processo, bem como seu sensoriamento, utilizando

dispositivos de campo, como sensores, microcontroladores, dispositivos de entrada-saída, computadores, CLPs, entre outros, além da criação do modelo de visualização do processo, máquina ou dispositivo;

- **Comunicação:** Envolve a comunicação/integração de forma bidirecional e interoperável entre o elemento físico e o virtual no ambiente de interação (aplicação). Essa etapa leva em consideração 3 aspectos fundamentais: *processamento na borda*, responsável pela conexão entre sensores e sistemas de agregação/armazenamento de dados, além da tradução de protocolos; *interfaces de comunicação*, responsáveis pela transferência de dados entre os diferentes dispositivos envolvidos na modelagem do Gêmeo Digital e *segurança na borda*, destacando o uso de tecnologias de cibersegurança, como *firewalls* e criptografia via geração/conferência de certificados;

- **Agregação:** é a camada responsável pela ingestão, ou inserção e armazenamento, e processamento dos dados pré-tratados. A agregação trabalha sob regras, cálculos e funções pré-definidas pelo arquiteto da solução do Gêmeo Digital, podendo esta ser realizada inteiramente na nuvem, tendo em vista que é uma tarefa de análise de dados históricos, portanto, não necessitando de dados instantâneos em tempo real;

- **Análise:** esta etapa traz conceitos mais modernos de análise de dados. Esta área tem evoluído nos últimos anos, tendo em vista o vasto surgimento de soluções de análise de dados, empregando os mais modernos algoritmos, como os envolvendo aprendizagem de máquina e inteligência artificial;

- **Insights:** contém a forma de melhor representar os resultados da análise dos dados do Gêmeo Digital. Nessa etapa, estão os sistemas de visualização de dados, capazes de gerar insights e auxílio à tomada de decisão para os usuários do sistema de simulação. Há também a comparação entre dados reais e esperados, podendo indicar o bom ou mal funcionamento de um elemento em face ao seu comportamento esperado;

- **Ação:** é de suma importância ao bom funcionamento do equipamento físico, consiste na realimentação do sistema, ou seja, há a possibilidade de correção ou otimização do funcionamento do elemento físico de acordo com as boas simulações, previsões, prescrições e aproximações realizadas pelos modelos das camadas anteriores. Os insights direcionam a tomada de decisão e as ações são então traduzidas para as linguagens de máquina, capazes de transformar decisões em sinais elétricos, realizando a ação desejada no elemento físico.

### 3.3 Integração IoT e Gêmeo Digital

Quando observa-se ambas abordagens, tanto das arquiteturas da IoT quanto da modelagem de Gêmeos Digitais, nota-se alguns pontos de compatibilidade e integração, capazes de usar um como cliente do outro, fazendo com que, por exemplo, um Gêmeo Digital consiga processar, analisar e representar virtualmente um processo, máquina ou dispositivo utilizando uma arquitetura de IoT como

fornecedora de dados de sensoriamento, ou a IoT usar as análises e representações visuais de um Gêmeo Digital em suas camadas de aplicação e negócio, garantindo ainda mais possibilidades a esta tecnologia.

Grande parte das compatibilidades começam da base de um Gêmeo Digital: a camada de criação, onde, utilizando-se sensores e dispositivos, que são parte integrante da camada de percepção da arquitetura IoT, os Gêmeos Digitais obtêm seus dados. Além disso, um Gêmeo Digital e uma arquitetura IoT podem compartilhar seus dados entre suas camadas de comunicação, fato que pode ser facilmente realizado integrando-se as camadas de Transporte do IoT e Comunicação do Gêmeo Digital. As camadas de processamento de dados em ambas as tecnologias também destacam sua compatibilidade, uma vez que o Gêmeo Digital pode utilizar, em suas camadas de agregação, análise e insights, os dados tratados pelas camadas de Processamento e Negócio da arquitetura IoT. Portanto, observa-se uma grande possibilidade de integração, elucidando que a modelagem e construção de um modelo de Gêmeo Digital pode ser baseada na tecnologia e arquitetura IoT.

## 4. ARQUITETURA PROPOSTA

Observando-se as possibilidades de integração entre as arquiteturas IoT e modelagem de Gêmeo Digitais, e reduzindo-as de uma forma simplificada, propõe-se uma arquitetura mista ou resumida em três camadas, capaz de implementar um Gêmeo Digital baseado na arquitetura IoT, conforme visto na Fig. 2.

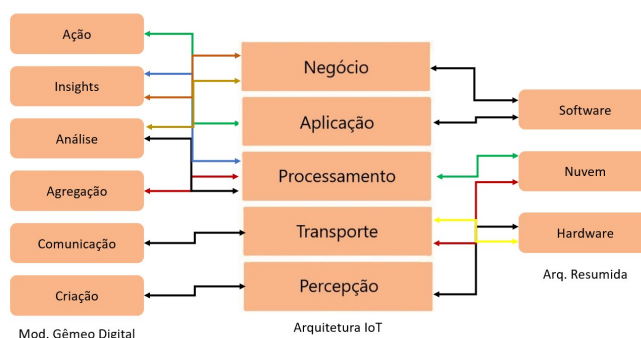


Fig. 2 Arquitetura resumida baseada na arquitetura IoT e modelagem de Gêmeo Digital.

Nessa arquitetura proposta, a camada de *Software* realiza funções como a de visualização de dados (instantânea e histórica), agregação e, com isso, poder gerar insights e servir aplicações voltadas ao usuário, o que pode ser observado nas camadas de Negócio e Aplicação da arquitetura IoT e Insights, Análise e Ação do modelo de Gêmeo Digital.

A camada de *Nuvem*, por ser voltada à infraestrutura, trata das camadas IoT de Transporte e Processamento de dados, realizando também o que é proposto nas camadas de Agregação e Comunicação do modelo de Gêmeo Digital.

Já a camada de *Hardware* trata dos dispositivos de campo, sendo, portanto, ligada às camadas IoT de Percepção e Transporte e, portanto, às camadas de Comunicação e Criação (sensoriamento) da modelagem de Gêmeos Digitais.

De forma geral, levando-se em consideração a aplicação da tecnologia de Gêmeo Digital em um medidor de energia elétrica para auxílio na gestão de consumo energético de uma residência, o detalhamento da arquitetura resumida com as funções inerentes a cada uma das três camadas nessa aplicação pode ser visto na Fig. 3.



Fig. 3 Arquitetura resumida em 3 camadas proposta para a solução de Gêmeo Digital de um medidor de energia baseado em IoT.

A arquitetura detalhada observada na Fig. 3 traz o resumo das três camadas propostas para a arquitetura deste trabalho. Tudo começa na camada de *Hardware*, composta pelos sensores e microcontrolador (SCT-13, ZMPT101B e ESP-32), onde as grandezas elétricas que caracterizam o consumo energético são medidas por sensores e convertidas em dados em um microcontrolador. Em seguida os dados vão para a segunda camada, que é a *Nuvem*, que utiliza o Google Cloud como servidor, o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) para comunicação, o *framework Node-RED* para transformação de dados, regras de negócio e cálculos, o banco de dados InfluxDB para armazenamento dos dados e o *framework Grafana* para visualização deles. A última camada, que é a de *Software*, utiliza os softwares *Unity* e *Vuforia* que possibilitam o desenvolvimento e visualização do Gêmeo Digital do medidor de energia, objeto a ser mensurado e virtualizado neste trabalho. Todas as aplicações da nuvem foram implementadas utilizando o ambiente *Docker*, que as gerencia e possui como vantagem a facilidade de instalação, *backup* e replicação, contribuindo para a alta disponibilidade delas.

As camadas serão melhor explicadas nas seções a seguir.

#### 4.1 Camada de Hardware

É a camada de sensoriamento e, portanto, conversão de grandezas de medição em dados. Levando-se em consideração a camada de comunicação da modelagem do Gêmeo Digital e a proposta do IoT, é importante que o dispositivo escolhido para conversão de sinais tenha boa capacidade de conectividade. Dessa forma, o dispositivo escolhido para realizar tal conversão foi o ESP-32 (modelo WROOM-D), tendo em vista sua forma facilitada de conexão via comunicação Wi-Fi.

De forma resumida, esta camada realiza duas importantes funções: extração de dados por meio dos sensores, sendo SCT-13 o sensor de corrente e ZMPT101B o sensor de tensão escolhidos, e transformação inicial dos dados, por meio de processamento local pela própria ESP-32, transformando sinais elétricos em dados transferíveis por um protocolo de integração IoT padrão.

#### 4.2 Camada de Nuvem

Segundo a modelagem do Gêmeo Digital, a computação por trás desta solução precisa entregar diversas funções, como análise, agregação, armazenamento de dados, aplicação de regras, entre outros. Dessa forma, levando-se em consideração a alta disponibilidade e capacidade de processamento otimizado da tecnologia de computação em nuvem, instanciou-se uma máquina em nuvem no provedor *Google Cloud Platform*, tendo importantes funções, tais como:

- **Comunicação:** a Nuvem precisa ser capaz não só de receber os dados da camada anterior, como também os distribuir entre seus serviços internos. Para tanto, visando otimizar o uso de rede pela nuvem, além da necessidade de baixo custo computacional para funcionamento em dispositivos como a ESP-32, o protocolo MQTT foi escolhido (Mishra e Kertesz, 2020);
- **Transformação de Dados:** envolve a conversão, tradução e agregação de dados junto às camadas de Processamento da arquitetura IoT e de Agregação da modelagem de Gêmeos Digitais. Aqui é possível calcular algumas métricas, até mesmo envolvendo o consumo energético, tirando essa tarefa da aplicação final de visualização, uma vez que esta tem o intuito de apenas visualizar os dados e deve possuir seu foco no uso de recursos computacionais apenas para isso. Dessa maneira, visando utilizar um *Software* leve, otimizando o processamento da máquina em Nuvem, além de possibilitar a transformação de dados, o *framework Node-Red* foi escolhido (Clerissi, et al., 2018);
- **Armazenamento:** pela necessidade de utilização de uma aplicação de armazenamento de dados com baixo custo computacional, foi escolhido o InfluxDB (Deryabin, et al., 2019).

#### 4.3 Camada de Software

De acordo com o proposto, a camada de *Software* possui duas funções principais:

- **Visualização de Dados:** baseada nas camadas de Análise, *Insights* e Ação da modelagem do Gêmeo Digital e Aplicação e Negócio da arquitetura IoT, a visualização de dados oferece análise de dados para a geração de *insights*. Levando-se em consideração trabalhos realizados com finalidade de visualização de dados por IoT e que apontavam uma boa usabilidade do Grafana (Maia, 2020), essa ferramenta foi então escolhida;
- **Visualização do modelo tridimensional do Gêmeo Digital:** para que possa visualizar o modelo tridimensional na etapa de criação da modelagem do Gêmeo Digital, a aplicação precisa de uma visualização multiplataforma. Para tanto,

foram utilizados dois softwares: *Unity* e *Vuforia* (responsáveis realidade aumentada do modelo tridimensional).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante da metodologia proposta, chegou-se à obtenção de uma solução de gestão do consumo energético residencial por meio da armazenagem, monitoramento e visualização dos dados de um medidor de energia com base em conceitos e tecnologias da indústria 4.0 e a modelagem de Gêmeo Digital, tendo sido escolhido um medidor de energia de uma residência com aproximadamente 100 m<sup>2</sup> localizada em Curitiba – PR como objeto de estudo, por tratar-se de um local de consumo energético considerável pois possui 4 moradoras.

Desse modo, conseguiu-se desenvolver o Gêmeo Digital de um medidor de energia real de uma residência. A visualização dos dados foi desenvolvida em duas etapas. A primeira diz respeito à criação de um *dashboard* para visualização dos dados de consumo da residência, presente na camada de *Software* da arquitetura resumida. Assim, utilizando-se os recursos do Grafana, foi possível disponibilizar ao cliente um ambiente que permite a visualização de dados históricos, tendo em vista que este possui integração ao banco de dados escolhido (InfluxDB), além de outros recursos da aplicação, como o sistema de logins, permitindo mais segurança e visualização restrita apenas a alguns usuários, além do mais, em sua interface visual, o Grafana disponibiliza a possibilidade de escolha de período de dados a serem visualizados. Na Fig. 4, observa-se a visualização dos dados por meio do Grafana:



Fig. 4 Versão final do *Dashboard* de Consumo Energético criado no Grafana

A segunda forma, constituindo a maior contribuição do presente trabalho, consiste na visualização instantânea e em realidade aumentada dos dados e do Gêmeo Digital desenvolvida nos *softwares Unity* e *Vuforia*. A integração destes *softwares* permite visualizar o gêmeo digital do medidor de energia e seus respectivos dados de consumo ao apontar a câmera do celular ou computador para uma imagem “gatilho”, como pode-se observar na Fig. 5.

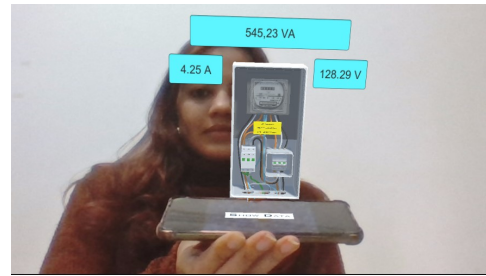


Fig.5 Gêmeo Digital em funcionamento utilizando-se a imagem de gatilho em um celular

Visando a redução do consumo energético residencial e uma análise de dados histórica, foi possível detectar padrões interessantes de consumo na residência ao utilizar a aplicação desenvolvida neste trabalho, fato que vem gerando bons resultados. Ao observar o gráfico total de consumo de corrente na residência em alguns dias, notou-se dois momentos de grande utilização de energia: entre as 07:00 h e as 09:00 h e entre as 18:00 h e 21:00 h. A Fig. 6 ilustra o comportamento de consumo em um dia, compreendendo o período entre o primeiro e o último minuto do dia 19/04/2022.



Fig. 6 Gráfico da corrente, compreendendo do primeiro ao último minuto do dia 19/04/2022.

Na investigação dos padrões de consumo, buscou-se calcular os percentuais de consumo dos dias nos intervalos de tempo com maior concentração de picos de consumo energético, ou horários de “pico” da residência, chegando-se às seguintes conclusões:

- Entre as 07:00 h e as 09:00 h, cerca de 8% do tempo total decorrido no dia, o consumo médio de energia é em torno de 38% do consumo diário;
- Já entre as 18:00 h e 21:00 h, cerca de 12,5% do tempo total decorrido no dia, o consumo energético médio calculado é de 41% do consumo diário;
- No resto do dia, cerca de 79,5% do tempo total decorrido no dia, o consumo médio calculado é de 21% do consumo diário.

Ou seja, consome-se quase 80% da energia em pouco mais de 20% do tempo do dia. Logo, observa-se a possibilidade da aplicação do princípio de Pareto (Pareto, 1935), que afirma que “[...] em qualquer situação, 20 por cento das entradas ou atividades são responsáveis por 80 por cento das saídas ou resultados” (Reh, 2019, p.1, *apud* Pareto, 1935). Pareto (1935) recomenda que as ações sejam focadas nas causas que ocasionam os 80% dos resultados. Por isso, uma investigação foi realizada de forma a obter as principais causas de consumo nas duas janelas de tempo citadas anteriormente.

A investigação, baseada no acionamento individual de cada carga e imediata medição desta utilizando a ferramenta do

dashboard desenvolvida neste trabalho para mensurar o impacto de cada uma no consumo, apontou que os picos de corrente no horário da manhã são ocasionados principalmente pelo uso de chuveiros elétricos, tendo em vista que é um horário que as quatro pessoas que vivem no apartamento estão os utilizando, em preparação para saírem para o trabalho. Além do que, por ser uma cidade de baixas temperaturas (Curitiba-PR), o uso do chuveiro elétrico é indispensável. Uma outra fonte causadora de picos de consumo é o ferro de passar roupas, que também faz parte do processo de preparação para a saída para o trabalho. Por fim, os secadores de cabelo, que são bastante utilizados, também geram um consumo extra de energia nesses horários.

Já no segundo intervalo de tempo (entre as 18:00 h e 21:00 h), horário em que não há tanto a utilização de ferros de passar roupa e secadores de cabelo, observou-se o uso mais demorado do chuveiro elétrico, uma vez que não há pressa para a finalização das duchas, já que não há a necessidade de ida para o trabalho, o que geralmente apressa as pessoas pela manhã. O uso do chuveiro suplanta o consumo de ferros de passar roupa e secadores durante a noite, pois neste intervalo o consumo é 3% maior que o intervalo anterior. Isto serviu de alerta aos consumidores da residência estudada. Por isso, chegou-se à conclusão de que a maior fonte de consumo energético da residência é o chuveiro elétrico.

Estudando os padrões de consumo durante os banhos observou-se que nenhuma das pessoas desligava o chuveiro durante o enxágue. Dessa forma, foi então instituído um teste, onde analisou-se 3 padrões de comportamento durante o banho:

- 1 – Acionamento contínuo do chuveiro: quando a pessoa utiliza o chuveiro ligado durante 100% do tempo do banho;
- 2 – Acionamento intervalado do chuveiro: quando a pessoa mantém o chuveiro ligado durante as operações de lavagem e enxágue;
- 3 – Acionamento único do chuveiro: quando a pessoa utiliza o chuveiro após cada operação de lavagem, acionando-o apenas a cada necessidade do uso de água e mantendo-o desligado em qualquer outra operação.

Os 3 padrões em questão foram observados na manhã do dia 18/04/2022 e geraram o gráfico de corrente da Fig. 7:



Fig. 7 Padrões de comportamento de banho sugeridos, no dia 18/04/2022. O padrão 1 está destacado em vermelho, o padrão 2 está destacado em amarelo e o padrão 3 está destacado em azul

Assim, foi feita uma análise quantitativa nas três abordagens, que resultou nos seguintes dados:

O padrão 1 consome cerca de 56% mais energia que o padrão 2, além de consumir mais de 8,3 vezes a energia consumida

pelo padrão 3. Dessa forma, se o usuário utilizar apenas o padrão 3 para banhos, estima-se uma economia de 88% de consumo energético, enquanto utilizando-se o padrão 2, estima-se economia de cerca de 35% de energia.

Então, após uma simples investigação utilizando-se os dados já disponibilizados pela aplicação, foi possível executar ações capazes de reduzir o consumo, contribuindo para a eficiência energética da residência. Por isso, no dia escolhido (19/04/2022) para testar o padrão de menor consumo observado no dia anterior, pôde-se notar a redução de cerca de 66% do consumo de energia ao fazer uma comparação com o mesmo período em relação ao dia 18/04/2022, entre as 07:00 h e as 09:00 h, como se verifica na Fig. 8(a) e 8(b).



Fig. 8 (a) Comportamento do consumo do chuveiro elétrico, entre as 07:00 h e 09:00 h. no dia 18/04/2022 (b) Comportamento do consumo do chuveiro elétrico, entre as 07:00 h e 09:00 h. no dia 19/04/2022

Dessa forma, observa-se a capacidade de redução de cerca de 25% do consumo energético total na residência, apenas levando-se em consideração o período citado e considerando os testes.

Diante disso, por meio desse tipo de abordagem e de posse dos dados de consumo, o cliente tem cada vez mais capacidade de analisar, de forma simples, as melhores formas de reduzir seu consumo energético, observando os hábitos e quais equipamentos consomem mais energia. Em casos em que há dinamização da tarifa, por exemplo, onde há horários de maior utilização de energia pela população (horários de “pico”), a cobrança fica ainda mais cara, e a economia passa a ter ainda mais efeito, reduzindo o consumo energético e consequentemente a tarifa mensal de energia.

## 6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou a aplicação de algumas tecnologias da área da indústria 4.0, como Internet das Coisas, Computação em Nuvem, Simulação (Gêmeos Digitais), Realidade Aumentada e Integração de Sistemas no contexto do uso da tecnologia para aumento da eficiência energética na classe de consumo residencial, área responsável por um grande impacto no consumo energético brasileiro. Assim, utilizando-se o conhecimento gratuito obtido em diferentes fontes, tecnologias de redes já existentes e populares, como o Wi-Fi, e dispositivos de baixo valor, como o microcontrolador ESP-32 modelo WROOM-D, foi possível modelar e desenvolver um Gêmeo Digital baseado em uma arquitetura de Internet das Coisas, visando a extração, monitoramento, armazenagem e visualização de dados históricos e instantâneos do consumo energético de um medidor de energia real, levando as tecnologias da Indústria 4.0 ao campo residencial, tirando tais tecnologias do contexto

industrial e provando conceitos sobre a utilização destas em outras áreas de aplicação.

Como sugestão de melhorias para as próximas pesquisas, sugere-se a aplicação de inteligência, como algoritmos de aprendizagem de máquina ou inteligência artificial nas etapas de Análise e Insights de dados na modelagem do Gêmeo Digital, visando a predição de consumo energético residencial e/ou observar padrões e, com eles, oportunidades de otimização automática deste consumo.

## REFERÊNCIAS

- Alonso, P. H.; Hernan, R. J.; Holger, M. R. Monitoreo del Consumo de Energía Eléctrica Domestica con Arduino. In: *15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education"*, Boca Raton, Anais. jul. 2017, p. 19-21
- Alulema, D.; Zapata, M.; Zapata, M. A. An IoT-based Remote Monitoring System for Electrical Power Consumption via Web-Application. In: *2018 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, Quito, 27 jul. 2018, p. 193-197.
- Amaral, J.; Brandão, R. F. M., REIS, C. Energy Management Systems. In: *2013 48th International Universities' Power Engineering Conference*, Dublin, Anais. 2 set. 2013, p.1-6.
- Arenas, L., A. O. MEDIDOR INTELIGENTE DE ENERGIA ELÉTRICA EMBARCADO EM FPGA. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 19. 2019.
- Bharati, R. Madhushree, M. E.; Kumari, P. Power Consumption Monitoring System using IoT. *International Journal of Computer Applications*, Nova Iorque, v. 173, set. 2017, p. 23 – 25.
- Chen, J. et al. The challenges of entering the metaverse: An experiment on the effect of extended reality on workload. *Information Systems Frontiers*, Nova Iorque, 25, fev. 2022.
- Clausen, A. et al. A digital twin framework for improving energy efficiency and occupant comfort in public and commercial buildings. *Energy Informatics*, 4, set. 2021.
- Clerissi, D. et al. Towards an Approach for Developing and Testing Node-RED IoT Systems. In: *ACM SIGSOFT International Workshop on Ensemble-Based Software Engineering*, Anais. nov. 2018, p. 1–8.
- Deryabin, A. et al. Architecture of Compressor Equipment Monitoring and Control Cyber-Physical System Based on Influxdata Platform. In: *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Anais. 25 mar. 2019, p. 1-5.
- Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2021, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>, Acesso em: 13 mar. 2022.
- Fernandes, J. P. O. Proposta de Metodologia para Gestão de Produção, Visando Redução no Consumo de Energia Elétrica em uma Unidade Fabril do Setor de Bens de Consumo. *Trabalho de Conclusão de Curso* – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- Maia, J. A. S. Arquitetura Base para Soluções de Internet das Coisas: Aplicações de Telemetria e Computação na Ponta Com Uso de Microsoft Azure nos modelos de IaaS, PaaS e SaaS. *Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos)* – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.
- Martínez, J. A.; López-Morales, J. A.; Skarmeta, A. F. Improving Energy Efficiency of Irrigation Wells by Using an IoT-Based Platform. *Electronics. Basel*, v. 10, jan. 2021.
- Masud, M., Said, O. Towards Internet of Things: Survey and Future Vision. *International Journal of Computer Networks*, 5, fev. 2013, p. 1-7.
- Mishra, B., Kertesz, A. The Use of MQTT in M2M and IoT Systems: A Survey. *IEEE Access*, Adelaide, v. 8, 04 nov. 2020, p. 201071 - 201086.
- Pareto, V. *The Mind and Society*, Nova Iorque: Harcourt, Brace and Co., 4ª Ed, 1935.
- Parrott, A. Warshaw, L. Industry 4.0 and the digital twin. *Deloitte University Press*, Westlake, 12 mai. 2017, p. 1–17.
- Reh, Pareto Principle or the 80/20 Rule, 2019. Disponível em: <<https://www.thebalancecareers.com/pareto-principle-the-80-20-rule-2275148>>, Acesso em: 03 fev. 2022.
- Sarangi, S. R., Sethi, P. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Londres, 26 jan. 2017.
- Silva, R. B. Gêmeo Digital de um objeto: aplicação da etapa de criação de um poste de iluminação pública. p. 42. *Trabalho de Conclusão de Curso* – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.
- Úbeda, B.; Moreno, M. V.; Skarmeta, A. F.; Zamora, M. A. How can We Tackle Energy Efficiency in IoT Based Smart Buildings? *Sensors. Basel*, 14, mai. 2014, p. 9582 – 9614
- Wu, M. et al. Research on the architecture of Internet of Things. In: *3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*, Chengdu, Anais. 20 ago. 2010, p. V5-484-V5-487