

SISTEMA IOT PARA CLIMATIZAÇÃO EFICIENTE DE AMBIENTES EM EDIFICAÇÕES INTELIGENTES

MURILO NICOLAU*, LETÍCIA M^A SATHLER VIANNA*, MATEUS GIESBRECHT*, FABIANO FRUETT*

*Av. Albert Einstein, 400, sala 207
Cidade Universitária Zeferino Vaz
Distrito Barão Geraldo – Campinas - SP Brasil

Emails: nicolau@fem.unicamp.br, leticiav@dsif.fee.unicamp.br, mateus@fee.unicamp.br, fabiano@unicamp.br

Abstract— This article presents a Wireless Transducer Network for massive application on thermal comfort and energy consumption optimization of a typical office building. The measurements taken by the network were used to identify a first order thermal model. A comparison between the measured temperature data and the model output shows a mean square error less than three times the sensor accuracy. With a model of the room, in the future, simulations will allow the definition of an optimal control policy to minimize the electric energy consumption.

Keywords— IoT, WSN, Sensors network, Smart buildings.

Resumo— Esse artigo apresenta uma Rede de Transdutores sem Fio para aplicação no conforto térmico e otimização do consumo de energia de um típico edifício de escritórios. As medições feitas foram utilizadas na identificação de um modelo térmico de primeira ordem. A comparação entre os valores de temperatura medidos e as saídas do modelo mostra que os erros quadráticos foram menores que três vezes a exatidão dos sensores de temperatura. Tendo um modelo da sala, no futuro, poderão ser feitas simulações de maneira a definir uma política de controle ótima que minimize o gasto de energia elétrica.

Palavras-chave— IoT, WSN, Rede de sensores, Edificações inteligentes.

1 Introdução

Neste artigo é apresentada uma Rede de Transdutores sem Fio (RTSF) projetada para utilização em Edificações Inteligentes (*Smart Buildings*). Essa rede visa monitorar e controlar as condições ambientais relacionadas ao conforto térmico de uma sala. Ela também permite o estudo do comportamento térmico da sala em diferentes situações como: efeitos de temperatura e umidade externos, o uso de condicionadores de ar, número de pessoas presentes, portas e janelas abertas ou fechadas. Estas situações podem ser avaliadas todas separadamente ou em conjunto.

A aquisição de informações sobre as variáveis do ambiente permite sintetizar um modelo térmico da sala. Para isso, todas essas informações foram coletadas de forma a gerar a maior quantidade de dados possível, visando criar um algoritmo otimizado de controle das condições ambientais e de consumo de energia elétrica.

A seção 2 apresenta a motivação que levou ao projeto e implementação da RTSF. A seção 3 apresenta a descrição da sala onde o sistema foi instalado. Na seção 4 todas as partes do sistema são descritas. A seção 5 descreve o funcionamento do sistema e apresenta um exemplo de algumas medidas. Na seção 6 o modelo matemático da sala é descrito. Na seção 7 são apresentados os resultados da aplicação do modelo térmico aos dados medidos pela RTSF.

2 Motivação

O consumo mundial de energia está crescendo a cada ano (EIA, 2019c). Esse crescimento não está atrelado apenas ao crescimento da população. O estilo de vida moderno também tem contribuído para o aumento do consumo *per capita* de energia (EIA, 2019a). Isso inclui todos os tipos de energia: térmica, mecânica, elétrica. No caso da energia elétrica a taxa de crescimento é ainda maior (EIA, 2019b). No Brasil a situação se repete. A participação do consumo de energia elétrica pelo total de energia consumida passou de 16,6 % em 2009 para 18 % em 2018 (EPE, 2019).

O consumo de energia elétrica por setor no Brasil está distribuído da seguinte maneira: industrial 37,5 %, residencial 25,4 %, comercial 16,9 % e público 8,2 % (EPE, 2019). O consumo de energia elétrica para o condicionamento ambiental em relação ao consumo total por setor é de 20 % para o setor residencial, 47 % para o comercial e 48 % para o público (ELETROBRAS, 2009). Essa parcela corresponde a 17 % da energia elétrica produzida. Esse gasto de energia com condicionamento ambiental é uma consequência das descobertas de materiais e técnicas de construção modernas a partir da revolução industrial e da internacionalização da arquitetura, principalmente no período entre guerras. Principalmente a partir da Segunda Guerra Mundial, com o aumento da oferta de energia e o uso em massa de equipamentos de condicionamento ambiental, os arquitetos abandonaram as práticas de adequar os

projetos às condições climáticas locais. Somente após o choque do petróleo na década de 70 quando a oferta de energia barata diminuiu drasticamente e com o aumento da população urbana na década de 80 isso começou a mudar. A partir do final da década de 80 e começo de 90 quando diversos acordos com o tema sustentabilidade foram firmados, as práticas de projetos eficientes voltaram a estar em evidência. Alguns exemplos são as leis e diretrizes sobre eficiência energética em edificações surgidas em 2005 e 2006 nos Estados Unidos e na Europa respectivamente (Lamberts et al., 2014).

Além de projetos arquitetônicos eficientes, também existem sistemas de resfriamento e/ou aquecimento que podem atingir uma boa performance no controle da temperatura ambiente com menor necessidade de energia. Isso pode ser alcançado com a utilização de inversores de frequência nos compressores, sistemas de armazenamento térmico (termoacumulação), sistemas de Potência e Calor Combinados (CHP, do inglês *Combined Heat and Power*) (Bzura, 2008; Knowles, 2011), dentre outros. Entretanto o uso desses sistemas ainda é pequeno. Cerca de 80 % dos aparelhos condicionadores utilizados são do tipo *split* de parede (ELETROBRAS, 2009).

O gasto energético com condicionamento ambiental é uma fonte potencial de economia de grande importância, mediante a combinação da redução da carga térmica aliada ao uso de tecnologias eficientes de refrigeração de ambientes e melhor controle dos sistemas.

Além disto, há uma crescente tendência na utilização de energia renovável: solar e eólica, como meio de reduzir a demanda pela energia provida pela concessionária. No entanto, as fontes de energia renováveis não são perenes e devem ser administradas de forma inteligente. Por exemplo, no momento de maior disponibilidade de energia solar, pode-se decidir armazená-la na forma de condicionamento térmico de salas e escritórios que estão sendo utilizados naquele momento de grande insolação, ou que tenham uma previsão de uso nas próximas horas. Essa decisão depende de um Rede de Transdutores (sensores e atuadores) comunicando em tempo real.

O propósito do sistema apresentado nesse artigo é permitir que qualquer tipo de edificação seja energeticamente eficiente através do melhor controle dos sistemas instalados. Assim, esse projeto tem como objetivo a implementação (*hardware* e *software*) de uma RTSF para estudo da eficiência energética em edificações inteligentes. Além disso, o sistema foi idealizado para ser integrado com sistemas de mini geração de energia fotovoltaica e/ou eólica.

Para definir uma política de controle ótima dos equipamentos de condicionamento ambiental é fundamental que se tenha um modelo matemático que represente o comportamento térmico do

sistema sob estudo. Essa modelagem matemática pode ser vista como um dos níveis de um projeto de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) e pode ser feita utilizando ferramentas de identificação de sistemas dinâmicos (Ljung, 1998).

3 Descrição da sala

A sala onde está sendo desenvolvido esse projeto é um escritório na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Unicamp com dimensões de 4,65 m x 4,65 m x 3 m, portanto com 64,9 m³. As janelas tem largura de aproximadamente 1 m e apontam para o noroeste e contam com brises (quebra-sol) de concreto. Nenhuma parede recebe insolação direta. Ela possui duas mesas. Em geral tem-se duas pessoas na sala embora esse valor possa variar conforme a utilização. No entanto, não é uma sala com grande fluxo de pessoas.

A sala possui três aparelhos de condicionamento ambiental. Um deles é um aparelho condicionador de ar de 12000 btu tipo janela. Também foram instalados dois resfriadores/evaporadores adiabáticos com uma taxa de fluxo de 2250 m³/h cada um. A RTSF possui três sensores ambientais e três sensores de grandezas elétricas. Na Figura 1 são apresentadas a planta baixa da sala e a localização dos sensores, aparelhos condicionadores, porta e janelas. Segue uma descrição das siglas contidas na Figura 1.

- SA1, SA2 e SA3: são os sensores ambientais¹
- SE1, SE2 e SE3: são os sensores elétricos¹
- EV1 e EV2: indicam os evaporadores adiabáticos
- AC: indica o aparelho condicionador de ar

4 Descrição do sistema

A rede de transdutores sem fio desenvolvida é uma típica aplicação de IoT. Todo sistema IoT tem caráter multidisciplinar pois envolve ao menos as áreas de computação, comunicação, eletrônica e análise de dados. Portanto é interessante um método para o desenvolvimento e implementação de projetos de IoT.

O método que foi utilizado nesse projeto é chamado de Método das Três Fases (TPM, do inglês *Three-Phase Method*) (Ferreira et al., 2019). Esse método foi desenvolvido como ferramenta para o ensino de disciplinas de IoT. Além de facilitar o desenvolvimento e implementação de soluções IoT, ele também serve para a documentação dos projetos. Nesse artigo será apresentado o resultado da aplicação desse método para

¹ Mais detalhes sobre os sensores na seção 4.8

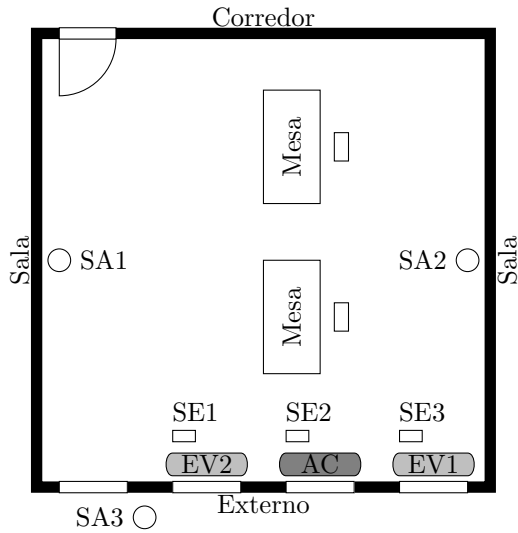


Figura 1: Vista da planta da sala e localização dos sensores e aparelhos condicionadores de ambiente.

a descrição do sistema. A descrição é baseada no Modelo de Referência Aberto para IoT proposto por (Déo, 2018). Esse modelo utiliza seis níveis de abstração para descrever o sistema IoT. São eles: aplicação, abstração, armazenamento, borda, conectividade e dispositivo. Esses seis níveis serão utilizados a seguir para descrever todo o sistema apresentado nesse artigo.

Além desses seis níveis o TPM acrescenta dois outros níveis, que são o nível do negócio e o nível das coisas. De forma sucinta, o nível do negócio apresenta o objetivo e as restrições do projeto. O nível das coisas especifica as entidades necessárias para atingir os objetivos do negócio. Entende-se por coisas as grandezas físicas como temperatura, pressão, umidade, vibração, ou dispositivos como câmeras, relés, chaves, botões, etc. A Figura 2 ilustra a estrutura do modelo.

A seguir cada um dos níveis do modelo é descrito.

4.1 Negócio

A finalidade do projeto é criar um sistema IoT capaz de minimizar o gasto energético com o condicionamento ambiental de uma sala na FEEC - UNICAMP.

A principal restrição para o projeto, definida pelas regras do negócio, é atingir o objetivo minimizando os custos de instalação do sistema. Dessa maneira fica inviável qualquer intervenção de obras civil ou estrutural na sala. Também é importante utilizar os aparelhos de condicionamento ambiental já disponíveis na sala, quando houver, a fim de evitar gastos extras. Isso permite que o sistema seja implementado em qualquer tipo de edificação.

Em relação à parte eletrônica, a restrição principal é utilizar dispositivos e sensores comerciais

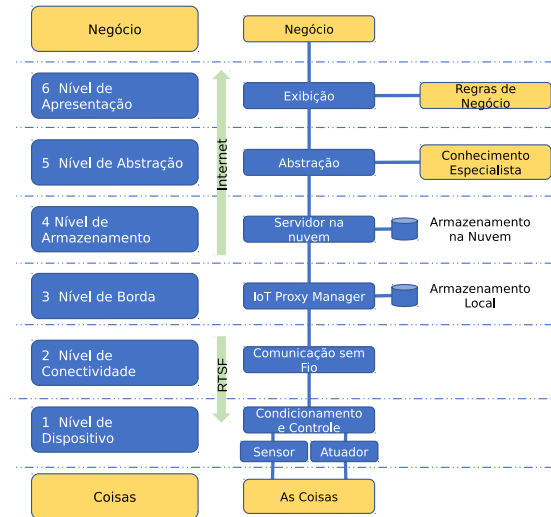


Figura 2: Modelo de referência aberto para IoT (Ferreira et al., 2019).

de baixo custo que atendam às necessidades do projeto. Baixo custo significa que o retorno do investimento na RTSF deve ser pago nos dois primeiros anos de sua instalação, apenas com a economia proporcionada.

Os *softwares* utilizados no projeto devem ser livres e de código aberto, facilitando assim a reprodutibilidade do projeto.

4.2 Coisas

Foi identificado que para atingir o objetivo identificado pelo negócio, serão necessárias informações de temperatura e umidade internas e externas à sala, de energia consumida pelos aparelhos utilizados para resfriar a sala, estado de porta e janelas (abertas ou fechadas) e também sobre fontes de calor presentes dentro da sala.

4.3 Apresentação

No nível da apresentação são definidas as informações que serão exibidas para os usuários. Também são definidas as formas que essas informações são apresentadas. Neste trabalho, o *software* utilizado para exibição dos dados é o EmonCMS. Esse *software* faz parte de um projeto de código aberto chamado OpenEnergyMonitor. Ele permite a exibição dos dados medidos em forma de gráficos. Também é possível a exibição dos valores em tempo real através de um painel que pode ser customizado pelo usuário.

4.4 Abstração

O nível da abstração é onde é feita a análise dos dados medidos. Nele essas medições são tratadas e a partir delas são geradas informações que serão utilizadas pelo usuário para análise e tomadas de decisão. Nesse nível encontra-se o modelo térmico

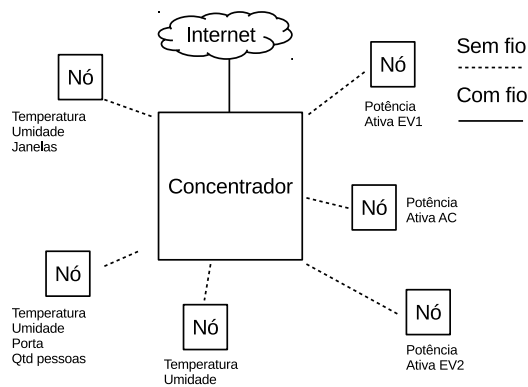


Figura 3: Topologia da rede de sensores sem fio.

da sala. Esse modelo é descrito com mais detalhes na seção 6.

4.5 Armazenamento

Nesse nível são definidas as soluções de armazenamento dos dados. É utilizado nesse projeto somente armazenamento local, que é gerenciado pelo *software* EmonCMS. Esse *software* permite a utilização de servidores em nuvem para o armazenamento de dados. Na etapa atual do projeto do sistema optou-se por não utilizar essa funcionalidade.

4.6 Borda

O nível de borda diz respeito ao *hardware* que faz a interface entre a rede de dispositivos IoT e os níveis de armazenamento. Esse *hardware* também é chamado de agregador/concentrador de dados ou *gateway*. Para isso é necessário que esse *hardware* disponha de interfaces de comunicação capazes de interagir tanto com os dispositivos IoT (geralmente comunicação sem fio) quanto com os de armazenamento (geralmente a internet).

O dispositivo escolhido para essa tarefa é um computador de placa única RaspberryPi modelo 3B+. Esse dispositivo foi escolhido por atender as necessidades de comunicação descritas acima, por ter baixo custo, pela versatilidade de automação de processos através de *scripts* e por sua ampla gama de projetos e documentação na internet, facilitando a manutenção do sistema. Além disso esse computador pode rodar o *software* EmonCMS responsável pela exibição e armazenamento dos dados.

A comunicação entre o concentrador, os diversos nós da rede e a internet é apresentada na Figura 3.

4.7 Conectividade

A conexão entre os vários sensores da rede e o concentrador se dá por um ponto de acesso (AP,

Access Point) Wi-Fi. Esse ponto de acesso é provido pela própria RaspberryPi que possui um rádio para comunicações sem fio. Esse também é um ponto positivo na escolha da RaspberryPi como dispositivo de borda.

Os dados são enviados pelos sensores para o concentrador através da rede sem fio utilizando os protocolos MQTT e Websocket. Esses protocolos são apropriados para a transmissão de dados de forma quase contínua e com pouco volume de tráfego.

4.8 Dispositivo

No nível dos dispositivos encontram-se os nós da rede. Eles são responsáveis por fazer a interface entre as coisas descritas na seção 4.2 e a rede, formando a rede das coisas (IoT). Cada um desses nós é composto por elementos sensores, condicionamento de sinais e rádios de conexão com a rede. Na rede IoT implementada existem dois tipos de nós sensores diferentes. Um responsável pelas medidas elétricas e outro pelas medidas das condições ambientais. Os dois tipos utilizam um microcontrolador da fabricante Espressif modelo ESP32. Esse microcontrolador é próprio para aplicações IoT, já que tem integrado um módulo para comunicações sem fio.

O nó sensor responsável pelas medidas elétricas é uma tomada inteligente que utiliza um DSP modelo MSP430 da Texas Instruments para medir valores de tensão e corrente através de um circuito condicionador. Esse DSP também faz os cálculos de potência consumida. Mais detalhes sobre o funcionamento desse dispositivo podem ser consultados na referência (Serrano et al., 2019).

O nó sensor responsável pelas medidas ambientais utiliza um dispositivo sensor modelo DHT22 capaz de medir temperatura e umidade relativa do ar com resolução de 0,1 °C e 0,1 % Rh, respectivamente. Esse nó também utiliza alguns sensores tipo *reed switch* que foram instalados para obter informação a respeito de porta e janelas abertas ou fechadas. Um desses nós sensores também possui um contador responsável por registrar o número de pessoas presentes na sala, conforme visto na Figura 3.

5 Funcionamento do sistema

Os sensores da rede medem todas as variáveis com uma taxa de amostragem de 0,1 Hz. Esses dados são enviados pelos sensores ao concentrador acompanhados da informação de um RTC (*real time clock*). O concentrador armazena essas informações em um banco de dados que fica gravado na sua memória. Os dados armazenados podem vistos em gráficos configuráveis pelo usuário como mostrado na Figura 4.

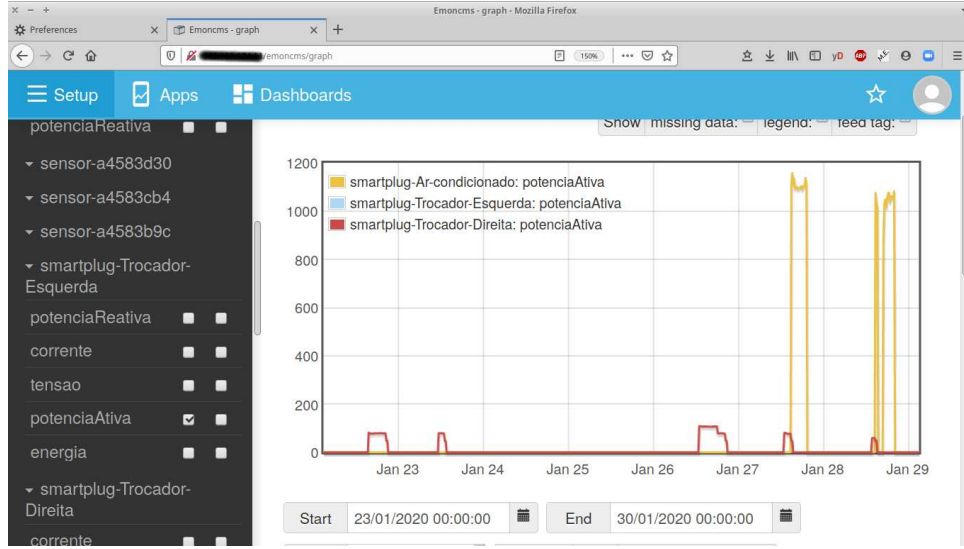


Figura 4: Amostras medidas da potência ativa no período de uma semana.

Além dos dados históricos (que estão armazenados no banco de dados) também é possível visualizá-los em tempo real por meio de gráficos ou outros indicadores que podem ser utilizados para criar painéis de visualização e controle como em um sistema supervisorio.

A potência instantânea total dos sensores e do dispositivo de gerenciamento da RTSF é de 10,6 W. Isso corresponde a menos de 1 % da potência total dos equipamentos utilizados para refrigeração da sala.

6 Modelo térmico

Utilizando medidas de um período de vinte e quatro horas, foi ajustado um modelo térmico de primeira ordem conforme descrito a seguir. Esse é um modelo simples e foi escolhido para validação do projeto da rede e dos dados medidos por ela.

6.1 Modelo de primeira ordem em tempo contínuo

O modelo térmico contínuo de primeira ordem utilizado neste trabalho é baseado nos trabalhos (Cheng et al., 2014; Cheng et al., 2016) e dado por:

$$C(t) \frac{dT_i(t)}{dt} = K(t)(T_o(t) - T_i(t)) + P_h(t), \quad (1)$$

sendo:

- $C(t)$ → capacidade térmica da sala (J/°C);
- $T_i(t)$ → temperatura interna da sala (°C);
- $K(t)$ → coeficiente de condução térmica (W/°C);
- $T_o(t)$ → temperatura externa à sala (°C);

- $P_h(t)$ → potência térmica resultante no espaço devido à atuação do ar condicionado, dos refrigeradores evaporativos e das fontes de calor (W);
- t → tempo (s).

A potência térmica resultante P_h é dada por:

$$P_h(t) = \alpha_o(t)P_o(t) + \alpha_{ar}(t)P_{ar}(t) + \alpha_r(t)P_r(t), \quad (2)$$

sendo:

- $\alpha_o(t)$ → coeficiente de performance (COP) de outras fontes (número de pessoas);
- $P_o(t)$ → potência de outras fontes (W);
- $\alpha_{ar}(t)$ → COP do ar condicionado;
- $P_{ar}(t)$ → potência elétrica instantânea do ar condicionado (W);
- $\alpha_r(t)$ → COP do refrigerador evaporativo;
- $P_r(t)$ → potência elétrica instantânea do refrigerador evaporativo (W);

assim, tem-se:

$$C(t) \frac{dT_i(t)}{dt} = K(t)(T_o(t) - T_i(t)) + \alpha_o(t)P_o(t) + \alpha_{ar}(t)P_{ar}(t) + \alpha_r(t)P_r(t), \quad (3)$$

em que os parâmetros do modelo a se determinar são: $\alpha_{ar}(t)$, $\alpha_o(t)$, $\alpha_r(t)$, $C(t)$, $K(t)$. O índice (t) é atribuído aos parâmetros a se determinar pois se tem o interesse de captar possíveis variações em seus valores.

6.2 Modelo de primeira ordem em tempo discreto

Foi realizada uma discretização de primeira ordem da derivada temporal de (3) por meio do método de Euler, resultando no seguinte modelo autorregressivo com entrada exógena (ARX):

$$T_i(k+1) = \theta_1 T_i(k) + \theta_2 T_o(k) + \theta_3 P_o(k) + \theta_4 P_{ar}(k) + \theta_5 P_r(k), \quad (4)$$

em que

$$\begin{aligned} \theta_1 &= 1 - \frac{\Delta t K(k)}{C(k)}; \\ \theta_2 &= \frac{K(k)}{C(k)} \Delta t; \\ \theta_3 &= \frac{\alpha_o(k)}{C(k)} \Delta t; \\ \theta_4 &= \frac{\alpha_{ar}(k)}{C(k)} \Delta t; \\ \theta_5 &= \frac{\alpha_r(k)}{C(k)} \Delta t; \end{aligned} \quad (5)$$

sendo

- $\Delta t \rightarrow$ período de amostragem
- $k \rightarrow$ instante de tempo
- $\theta_i, i = 1 \dots 5 \rightarrow$ parâmetros do modelo a serem identificados pelo método dos mínimos quadrados

6.3 Mínimos Quadrados Recursivos

Os parâmetros $\theta_i, i = 1 \dots 5$ apresentados em (5) podem ser estimados a partir dos dados medidos pela RTSF utilizando algoritmos recursivos. A vantagem do uso desses algoritmos é que variações nos parâmetros do modelo, que neste caso podem ser causadas pela abertura ou fechamento de portas e janelas, podem ser detectadas.

Na RTSF proposta neste trabalho há dois sensores de temperatura interna. Os dados dos sensores foram tratados de forma independente. Para cada um deles foi determinado um modelo MISO (Múltiplas Entradas e Uma Saída) conforme a estrutura (4), tendo como saída o valor da temperatura interna medido naquele sensor e como regressores os outros sinais envolvidos. Na notação adotada neste artigo, a variável $j = 1, 2$ identifica cada um dos modelos MISO. A equação para o modelo térmico MISO pode ser escrita na forma compacta apresentada por:

$$Y(j) = X(j)\Theta(j), \quad (6)$$

em que $X(j)$ é a matriz de regressores do modelo para a saída j , $Y(j)$ o vetor de saídas que representa a medição do sensor j e $\Theta(j)$ o vetor de

parâmetros para o modelo j , conforme equações (7), (8) e (9).

$$Y(j) = \begin{bmatrix} T_i(1, j) \\ T_i(2, j) \\ \vdots \\ T_i(N, j) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Theta(j) = \begin{bmatrix} \theta_1(j) \\ \theta_2(j) \\ \theta_3(j) \\ \theta_4(j) \\ \theta_5(j) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Nas equações (7), (8) e (9) N é o número de amostras. Foram utilizadas amostras coletadas durante um período de vinte e quatro horas para construir as matrizes.

As equações fundamentais de atualização de parâmetros do método RLS (Mínimos Quadrados Recursivos) são as seguintes:

$$\hat{\Theta}(k, j) = \hat{\Theta}(k-1, j) + K(k, j)\epsilon(k, j),$$

$$\epsilon(k, j) = Y(k, j) - X(k, j)\hat{\Theta}(k-1, j),$$

$$K(k, j) = \frac{P(k-1, j)X(k, j)}{1 + X(k, j)^T P(k-1, j)X(k, j)},$$

$$P(k, j) = P(k-1, j) - K(k, j)X(k, j)^T P(k-1, j), \quad (10)$$

sendo $X(k, j)$ e $Y(k, j)$ as k -ésimas linhas das matrizes $X(j)$ e $Y(j)$ respectivamente, $\hat{\Theta}(k, j)$ a estimativa para o vetor $\Theta(j)$ no instante k , $\epsilon(k, j)$ o vetor de inovações ou erro de predição no instante k para a saída j , $K(k, j)$ o ganho de correção, $P(k, j) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ a matriz de covariância da estimação.

Vale ressaltar que foi aplicada uma inicialização difusa no algoritmo, em que a matriz de covariância foi inicializada com valores elevados e o vetor de parâmetros com valores arbitrários.

A dedução e análise de características do método RLS podem ser encontradas de forma objetiva em (Young, 2011).

7 Resultados

A Figura 4 apresenta a potência elétrica consumida pelos resfriadores adiabáticos e o aparelho condicionador de ar. O consumo de energia pelo resfriador adiabático é de aproximadamente 80 Wh. Já o consumo de energia do condicionador de ar é de cerca de 1200 Wh. Portanto o condicionador de ar consome em média 15 vezes mais energia que o resfriador adiabático.

Na Figura 5 são apresentadas as estimativas das saídas dos modelos obtidos pelo método RLS (em azul) em comparação com os dados medidos (em vermelho). É possível observar que os valores estimados são muito próximos dos medidos.

$$X(j) = \begin{bmatrix} T_i(0,j) & T_o(0) & P_o(0) & P_{ar}(0) & P_r(0) \\ T_i(1,j) & T_o(1) & P_o(1) & P_{ar}(1) & P_r(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_i(N-1,j) & T_o(N-1) & P_o(N-1) & P_{ar}(N-1) & P_r(N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

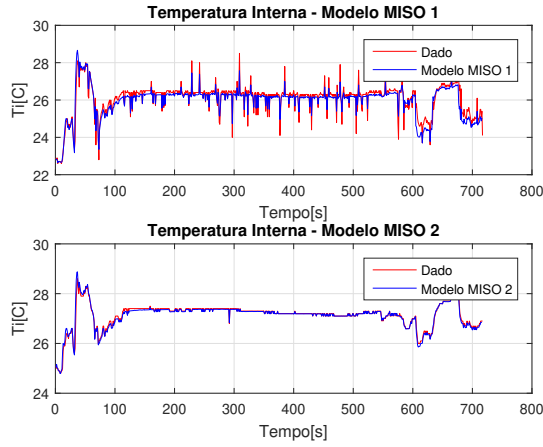


Figura 5: Estimativas das saídas dos modelos obtidos pelo método RLS em comparação com os dados medidos.

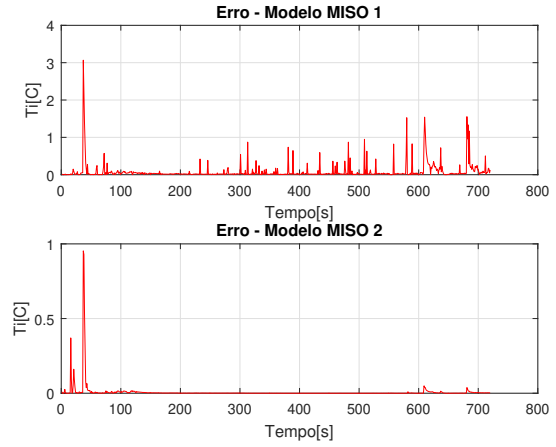


Figura 7: Erros quadráticos entre os modelos obtidos pelo RLS em relação com os dados medidos.

8 Conclusões

Uma Rede de Transdutores sem Fio (RTSF) foi projetada e construída. Por ser uma típica aplicação de IoT, foi utilizado um método de projeto voltado para sistemas IoT. Esse método facilitou não só a etapa de especificação de todos os componentes como também foi muito útil para a documentação da RTSF.

Foi identificado um modelo térmico de primeira ordem da sala onde a RTSF foi instalada para validar o projeto da rede e os dados medidos pelos sensores. Os erros quadráticos entre os valores medidos e os valores estimados pelos modelos ficaram abaixo de 1,5 °C após a convergência dos parâmetros. Esses resultados são aceitáveis dado que é um modelo de primeira ordem e que a exatidão das medidas do sensor de temperatura são de $\pm 0,5$ °C. Portanto conclui-se que o projeto da RTSF, ou seja, a escolha das variáveis a serem medidas, dos sensores e dos outros componentes, foi bem sucedido.

A partir do uso do modelo será possível projetar controladores ótimos para minimizar o consumo de energia dos aparelhos de climatização da sala. Com isso será possível uma economia da energia elétrica gasta com esses aparelhos, já que o uso exclusivo de aparelhos condicionadores de ar apresenta um gasto energético diversas vezes maior que os resfriadores adiabáticos. Além disso o sistema também pode sugerir outras alternativas de controle das condições ambientais como o uso de ventilação natural.

As próximas etapas do projeto são a integração do controle dos aparelhos climatizadores ao

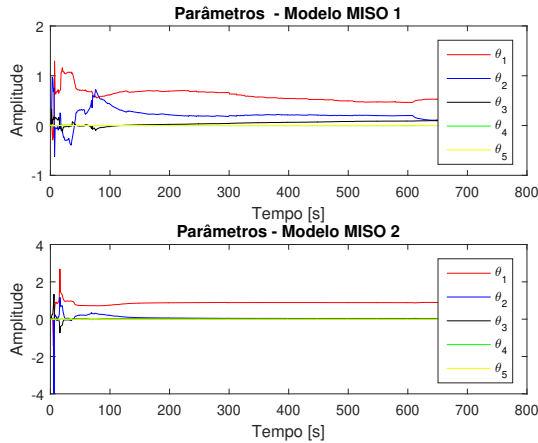


Figura 6: Parâmetros estimados dos modelos MISO.

Na figura 6 são apresentados os parâmetros obtidos ao aplicar o RLS sendo possível observar sua rápida convergência.

Por fim, na figura 7 são apresentados os erros quadráticos médios entre os modelos estimados e os dados medidos. Nota-se que para o modelo MISO 1 a grandeza dos valores dos erros foram superiores em comparação com os obtidos pelo modelo MISO 2. Os erros podem ter sido ampliados em decorrência da localização do sensor de temperatura interna utilizado para o modelo MISO 1, uma vez que este está localizado próximo à porta de entrada da sala. Verifica-se que para o modelo MISO 2 os valores de erros são próximos de zero, além de apresentar uma rápida convergência.

sistema e o desenvolvimento de políticas de controle ótimo para o sistema de climatização da sala.

Agradecimentos

Agradecemos à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação por ceder a sala para instalação da RTSF. Também ao projeto Campus Sustentável pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Bzura, J. J. (2008). Residential combined heat and power (chp) technologies ' an overview: Summary of a panel session presentation, *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–2.
- Cheng, D., Chu, X., Zhang, W., Liu, Y. and Hou, Y. (2014). Application of Particle Filter to Parameter Identification of Space Thermal Model, *2014 10th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, IEEE, pp. 589–593.
- Cheng, D., Zhang, W. and Liu, J. (2016). Window-varying particle filter for parameter identification of space thermal model, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **66**(1): 165–176.
- Déo, A. L. B. (2018). *Proposta de um modelo de referência open source iot - foco em pme*, Master's thesis, Pontífica Universidade Católica de Campinas, The address of the publisher. An optional note.
- EIA, U. S. E. I. A. (2019a). Energy use (kg of oil equivalent per capita), <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.PCAP.KG.OE>. Accessed: 2020-02-28.
- EIA, U. S. E. I. A. (2019b). International energy outlook 2019 key takeaway, https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo_infographics_3.pdf. Accessed: 2020-02-27.
- EIA, U. S. E. I. A. (2019c). International Energy Outlook 2019 with projections to 2050, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>. Accessed: 2020-02-27.
- ELETROBRAS (2009). Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe residencial relatório brasil - sumário executivo, *Technical report*, PROCEL. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil.
- EPE, E. d. P. E. (2019). Balanço energético nacional 2019: Ano base 2018, *Technical report*, Ministério de Minas e Energia - MME.
- Ferreira, L. C. B. C., Branquinho, O. C., Chaves, P. R., Cardieri, P., Fruett, F. and Yacoub, M. D. (2019). A pbl-based methodology for iot teaching, *IEEE Communications Magazine* **57**(11): 20–26.
- Knowles, J. (2011). Overview of small and micro combined heat and power (chp) systems, *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, Robert Beith, Woodhead Publishing, pp. 3–16.
- Lamberts, R., Dutra, L. and Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência Energética na Arquitetura*, 3 edn, ELETROBRAS/PROCEL.
- Ljung, L. (1998). *System Identification: Theory for the User*, 3 edn, Pearson Education.
- Serrano, T. M., da Silva, L. C. P., Pereira, L., Andreoli, F., Ji, T. and Fruett, F. (2019). A low-cost smart plug with power quality and energy analyzer features, *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1–6.
- Young, P. C. (2011). *Recursive Estimation and Time-Series Analysis: An Introduction for the Student and Practitioner*, 2 edn, Springer Science & Business Media.