

# Uma Solução para Tomadas de Decisões em um Ambiente Residencial baseado em *fog computing* e inteligência computacional

Geraldo P. R. Filho, José R. Torres Neto, Jó Ueyama

<sup>1</sup>Instituto de Ciência Matemáticas e de Computação – ICMC  
Universidade de São Paulo – USP  
13566 – 590 – São Carlos – SP – Brasil

{geraldop, joueyama}@icmc.usp.br, jrtorresneto@usp.br

**Abstract.** *The significant increase of the power consumption in the last years has attracted the attention of the researches, governments and organizations. The residential sector has contributed significantly to this increase. The Home Automation System, allied with the Internet of Things, is a promising solution to solve the problem of energy efficiency. In this context, it is possible to use Computational intelligence to help carry out the decision-making process and fog computing paradigm on to manage and processing of the actions in the residence in real-time. Therefore, this work proposes a solution for collecting, disseminating and controlling through wireless sensors and actuators the decision-making in a residential environment, which is based on fog computing and computational intelligence. As proof of concept, a prototype was developed with the purpose to demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed solution. The real results show that the proposed solution has a high hit rate with a low delay in the decision-making process, while maintaining an efficient dissemination of information with low energy consumption. Thus, the proposed system is feasible and applicable.*

**Resumo.** *O aumento significativo do consumo de energia nos últimos anos tem atraído a atenção dos pesquisadores, governos e organizações. O setor residencial tem contribuído, de forma significativa, para esse aumento. O Sistema de Automação Residencial, aliado com a Internet das Coisas, é uma solução promissora para o problema da eficiência energética. Neste contexto, é possível utilizar Inteligência Artificial para o auxílio de tomada de decisões em uma Rede de Sensores e Atuadores sem Fio e o paradigma fog computing na gerência e processamento das ações na residência em tempo real. Diante disso, este artigo propõe uma solução para coletar, disseminar e controlar por meio de sensores e atuadores sem fios as tomadas de decisões em um ambiente residencial, o qual é baseado em fog e Inteligência Computacional. Como prova de conceito, foi construído um protótipo com o intuito de demonstrar a viabilidade e eficiência da solução proposta. Os resultados reais evidenciam que a solução proposta possui alta taxa de acerto com baixo atraso no processo de tomada de decisão, enquanto mantém uma disseminação eficiente da informação com baixo consumo de energia. Assim, o sistema proposto é viável e aplicável.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, a eficiência energética tem sido um tema de pesquisa crescente, em pleno desenvolvimento e de interesse internacional. Nessa área, constatou-se que o consumo de energia tem aumentado de maneira significativa ao longo dos anos devido ao desenvolvimento econômico [Mineno et al. 2010] e ao uso indiscriminado da energia por parte da população [Filho et al. 2014]. Por causa desse aumento, os governos e organizações estão adotando políticas de conservação de energia para não enfrentar problemas no setor energético, como blecautes (do Inglês *blackout*) [Orestis et al. 2013]. Especificamente no Brasil, mais de 180 blecautes já foram registrados desde 2011, sendo 45 em 2013 e 65 em 2012, afetando, por exemplo, postos de saúde e linhas de metrô [G1 2014].

Nesse cenário, o setor residencial contribui com uma quantidade significativa no consumo de energia elétrica [Dittawit and Agesen 2013, Filho et al. 2014, Mano et al. 2016]. O Sistema de Automação Residencial (HAS), aliado com a Internet das Coisas (IoT), é uma das alternativas mais promissoras para solucionar o problema da eficiência energética [Siano et al. 2013]. Vale frisar que na IoT, seja qual for a “coisa” (física ou virtual), é possível conectar via Internet para monitorar, controlar e/ou usa-lá como elemento sensorador e atuador de uma arquitetura para interagir com o ambiente em que estão implantadas. No cenário de HAS, sensores e atuadores embarcados em microcontroladores (*raspberry pi* e *galileo* por exemplo) podem ser considerados como “coisas”. Assim, por meio dos dados providos dos sensores, o HAS permite gerenciar os recursos habitacionais da residência para a escolha da melhor ação, a qual é realizada mediante os atuadores, em benefício dos moradores [Jiang et al. 2004, Cheng and Kunz 2009, Mekikis et al. 2013, Lee et al. 2014]. Ainda, considerando que tais “coisas” podem intercomunicar-se, um sensor pode aproveitar a informação de um outro sensor para melhorar a qualidade da informação no processo de tomada de decisão na residência [Maia et al. 2015].

Atualmente, o paradigma de *fog computing*, também conhecido como computação em névoa, surge como um auxílio na IoT para satisfazer requisitos que não são atendidos por um modelo em nuvem centralizado. Ainda, o *fog* auxilia dispositivos que possuem recursos computacionais escassos, situação presente em sensores/atuadores embarcados em microcontroladores em uma HAS. O paradigma de *fog computing* estende os recursos computacionais disponíveis na infraestrutura da nuvem para a borda da rede, fornecendo mobilidade, escalabilidade, baixa latência e robustez no serviço aos usuários [Bonomi et al. 2014, Coutinho et al. 2016]. Destaca-se, ainda, que tal paradigma incorpora as análises das informações em tempo real, distribuindo o processo de tomada de decisão por meio dos recursos computacionais que o *fog computing* proporciona [Bonomi et al. 2014, Khalid et al. 2016]. Em outras palavras, as soluções baseadas em IoT estão mudando de direção, de um modelo centralizado para um modelo distribuído na nuvem por meio do *fog*.

Apesar dos avanços conquistados nessa área, os HASs são dependentes da sua rede interna para coletar, disseminar e atuar em uma casa inteligente [Filho et al. 2015b]. Existem diferentes tipos de infraestruturas, que vão desde as cabeadas com sensores analógicos até as sem fios com sensores digitais [Jiang et al. 2004, Cheng and Kunz 2009, Ramlee et al. 2013, Filho et al. 2013b]. As infraestruturas cabeadas possuem limitações

como dependência do ambiente e custosas devido a instalação da fiação. Por outro lado, as infraestruturas sem fios possuem facilidade na implantação do ambiente e baixo custo na instalação. Portanto, as Redes de Sensores e Atuadores sem Fio (RSASFs) [Akyildiz and Kasimoglu 2004] fornecem uma infraestrutura moderna e ubíqua para uma casa inteligente. Consequentemente, a RSASF combinada com o uso de *fog computing* é uma solução promissora para ser utilizada como infraestrutura de controle no HAS. A RSASF permite flexibilidade na remoção e/ou adição de componentes, facilidade em integrá-la dentro de outros *backbones*, além de ser escalável, colaborativa e de baixo custo.

Ainda que há um esforço crescente conquistado pelo uso da RSASF associado com o paradigma de *fog computing* em um HAS, correlacionar um grande volume de dados (qualitativos e quantitativos) obtidos dos sensores para o processo de tomada de decisão traz novos desafios, dos quais dois são comuns e merecem destaques. O *primeiro* desafio está relacionado como grande parte dos dados são apresentados, uma vez que são adquiridos de maneira implícita, bruta e incompreensível, para aproveitar alguma informação no processo de tomada de decisão. O *segundo* desafio está relacionado à interoperabilidade dos dispositivos, o que recai no problema de escalabilidade no processamento para as tomadas de decisões. Além disso, a falta de uma infraestrutura heterogênea, flexível e com baixo *overhead* são algumas das novas problemáticas a serem exploradas na literatura.

Para superar os desafios e limitações mencionadas anteriormente, este trabalho propõe uma solução para coletar, disseminar e controlar por meio de uma RSASF as tomadas de decisões em um ambiente residencial, o qual é baseado em *fog computing* e Inteligência Computacional. Nesse contexto, o *fog* é responsável por gerenciar e processar as ações na residência em tempo real. Já a inteligência computacional auxilia no processo de tomada de decisão. A idéia de *fog computing* é colocar os recursos computacionais mais próximo do utilizador final, processá-los localmente em nós mais robustos (Raspberry Pi) antes de repassá-los para a nuvem. Vale salientar, ainda, que para reduzir o *overhead* da infraestrutura, as funcionalidades da solução proposta são distribuídas entre os nós da rede. Como prova de conceito, foi construído um protótipo com o intuito de demonstrar a viabilidade e eficiência da solução proposta. Os resultados reais evidenciam que a solução proposta possui alta taxa de acerto com baixo atraso no processo de tomada de decisão, enquanto mantém uma eficiência na disseminação da informação com baixo consumo de energia.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, discutindo os principais desafios frente a esta pesquisa. A Seção 3 descreve como nossa solução foi desenvolvida. A Seção 4 apresenta o protótipo construído como prova de conceito para a solução proposta. A Seção 5 apresenta os resultados da avaliação de desempenho. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta os principais trabalhos encontrados na área de HAS, os quais utilizam uma RSASF como infraestrutura de controle para coletar dados e atuar em um ambiente inteligente. O intuito é discutir os principais desafios e problemas em aberto

nessa área que ainda não foram solucionados e que esta pesquisa investiga.

Atualmente, tem-se investigado o uso potencial das tecnologias de rede sem fio como infraestrutura interna de uma residência [Mantoro et al. 2011, Ramlee et al. 2013, Filho et al. 2013a, Mahmood et al. 2014, Filho et al. 2015a, Khan et al. 2016]. Particularmente em [Mantoro et al. 2011], é proposto um *framework* que é modelado com base em uma infraestrutura sem fio. Como prova de conceito do *framework*, foi desenvolvido um protótipo chamado *Integ's smart home*. O *Integ's smart home* permite monitorar e controlar as condições da sua residência através de um dispositivo móvel (por exemplo, *smartphone*) habilitado para a Internet. Já em [Ramlee et al. 2013], é proposto um sistema de automação residencial de baixo custo voltado para os eletrodomésticos. Para tanto, uma placa de controle principal (nó *sink*) é desenvolvida para gerenciar a comunicação entre os eletrodomésticos e os moradores. Entretanto, as soluções citadas anteriormente possuem limitações, diferenciando deste trabalho principalmente por serem desenvolvidas para aplicações específicas, além de não correlacionando os dados coletados entre as aplicações para melhorar a tomada de decisão.

Outros pesquisadores utilizam modelo espacial multidimensional para a tomada de decisão, como proposto por [Ming et al. 2016]. Os autores propõem um modelo espacial multidimensional para o controle de serviços em um ambiente inteligente, com ênfase na eficiência energética. No modelo multidimensional, cada parâmetro físico (sensor de temperatura e luminosidade) é abstraído em uma dimensão. Com isso, os serviços são formulados como um espaço de serviço multidimensional por meio da computação espacial. Por isso, é proposto um algoritmo de ajuste de potência mínima para o agendamento da eficiência energética em um ambiente inteligente. Entretanto, o modelo não possui um gerenciamento de serviços sem conflitos. Ainda, o modelo proposto não considera a informação de uma aplicação (sistema de iluminação ou HVAC) para melhorar a eficiência energética do ambiente, apenas os parâmetros físicos.

Outros trabalhos relacionados que merecem destaques são propostos por [Farias et al. 2013, Farias et al. 2014]. Convém salientar que o trabalho apresentado por [Farias et al. 2014], é uma extensão do trabalho realizado anteriormente em [Farias et al. 2013]. Particularmente em [Farias et al. 2014], é proposto um sistema de **CON**trole e **DE**cisão (CONDE) com o intuito de automatizar o processo de tomada de decisão em um ambiente usando uma RSASF. O CONDE é desenvolvido para coletar e manipular os dados sensoreados, processando-os dentro da própria infraestrutura. O CONDE utiliza processos de inferência como método para a tomada de decisão. Nesse caso, modelou-se um conjunto de parâmetros e regras simples para as decisões serem tomadas em cada aplicação ativa na RSASF. As limitações do CONDE em relação a este trabalho são: (i) regras pré-estabelecidas para a tomada de decisão; e (ii) há um indicativo de aumento do uso da memória a medida que novas aplicações são inseridas na infraestrutura.

O trabalho que mais se assemelha com esta pesquisa é apresentado por [Filho et al. 2015b]. Os autores [Filho et al. 2015b] propõem um sistema de decisão inteligente para uma infraestrutura residência distribuída utilizando sensores e atuadores sem fio, chamado ResiDI. O núcleo da inteligência do ResiDI é baseado em uma Rede Neural que visa melhorar a precisão da tomada de decisão, juntamente com um mecanismo de correlação temporal que é projetado para reduzir o consumo de energia da in-

fraestrutura. Apesar do ResiDI aproveitar o processamento da rede sem fio, melhorando a precisão na tomada de decisão, não é capaz de executar soluções robustas devido aos recursos escassos que uma RSASF possui. Além disso, os recursos computacionais (processamento e memória) não estão perto do utilizador final, podendo aumentar a latência de serviço. Vale frisar, ainda, que existe um problema de interoperabilidade e integração com novos dispositivos. Em outras palavras, possui um comportamento específico, e não genérico, dificultando assim sua adaptação a mudanças no ambiente.

Tabela 1. Resumo das lacunas identificadas nos trabalhos relacionados.

Trabalhos	Tomada de Decisão	Processo de Atuação	Overhead	Infraestrutura
[Mantoro et al. 2011]	X	X	X	X
[Ramlee et al. 2013]	—	X	X	X
[Farias et al. 2014]	✓	✓	X <sup>1</sup>	X <sup>2</sup>
[Filho et al. 2015b]	✓	✓	X	X
[Ming et al. 2016]	X	✓	—	X
Nossa solução	✓	✓	✓	✓

<sup>1</sup> Dispositivos com armazenamento escasso pode ser sobrecarregado a medida que são adicionadas novas regras de inferência;

<sup>2</sup> Apesar de preocuparem com a distribuição de papéis, utilizam nós com hardware homogêneos da plataforma MicaZ.

A Tabela 1 apresenta uma comparação dos trabalhos discutidos anteriormente considerando as seguintes características: (i) tomada de decisão, capacidade das soluções utilizarem técnicas de aprendizagem de máquina para atuar; (ii) processo de atuação, capacidade das soluções em incorporar o processo de decisão dentro do próprio nó; (iii) overhead, capacidade das soluções em prevenir sobrecarga na infraestrutura, como processamento e armazenamento em excesso; e (iv) infraestrutura heterogênea, capacidade das soluções em determinarem funções/papéis específicos para cada nó. Nesse tipo de infraestrutura, diferentes tipos de nós podem existir, apresentando requisitos de *hardware* específicos conforme a sua necessidade. Por causa das limitações encontradas nos trabalhos analisados, a seguir é apresentada a nossa solução proposta.

### 3. Solução Proposta

Esta seção apresenta uma solução para coletar, disseminar, detectar e controlar as tomadas de decisões em um ambiente residencial distribuído formando um *fog computing*. A solução é desenvolvida com base em técnicas de inteligência computacional para realizar o processo de tomada de decisão, bem como no uso do paradigma de *fog* para gerenciar e processar as ações na residência em tempo real. A idéia de *fog computing* é colocar os recursos computacionais mais próximo do utilizador final, processá-los localmente em nós mais robustos (Raspberry Pi) antes de repassá-los para a nuvem. Nossa solução foi desenvolvida para ter escalabilidade e robustez no processamento, reduzindo a latência de serviço, ao mesmo tempo em que provê um aumento na precisão para a tomada de decisão.

Na solução, os nós são munidos com uma interface de comunicação sem fio, armazenamento, processamento e bateria como fonte de *backup* para formar um ambiente computacional de *fog*. A Figura 1 ilustra a arquitetura de componentes da solução, na qual o *microkernel* realiza a instância e a conexão dos componentes para cada nó com seus respectivos papéis. Entende-se como papéis as funcionalidades específicas que são

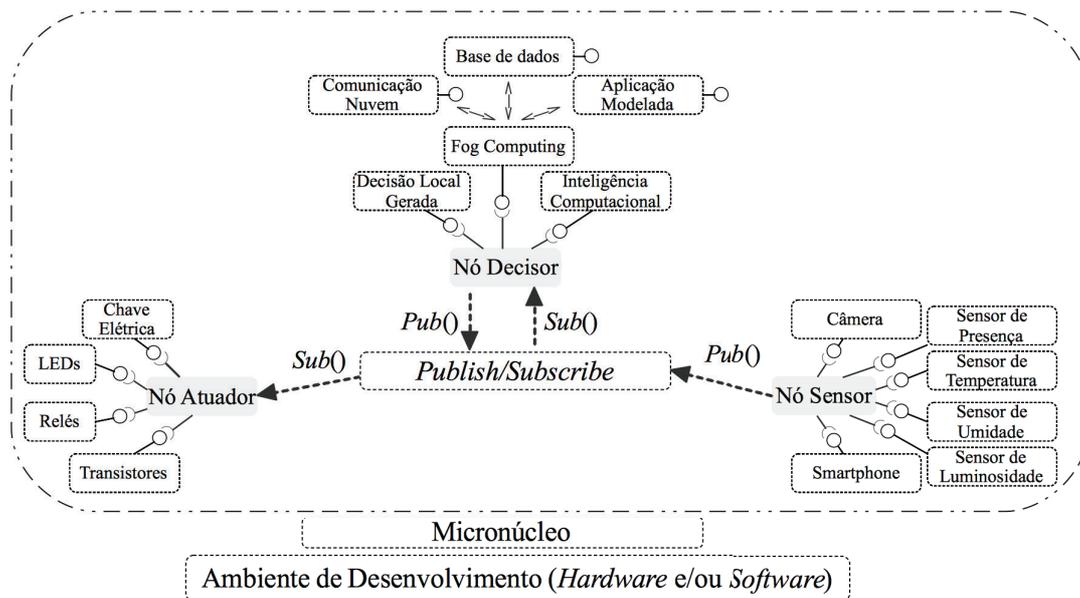


Figura 1. Cenário de funcionamento da solução proposta.

atribuídas para cada nó. Nesse ambiente, os nós publicam (*publish*) seus dados e, em seguida, os nós assinantes (*subscribe*) recebem os dados correspondentes para processar e retornar uma resposta. Com essas características, além de deixar a infraestrutura da nossa solução com alta disponibilidade para os nós que a compõem, é possível lidar em tempo de execução com a heterogeneidade de *hardware* e *software* de cada nó, deixando-o colaborativo e flexível para adição de novos recursos.

Para um melhor entendimento da proposta, a explicação da solução é dividida em três etapas, sendo elas: (i) a divisão dos papéis com a descrição do seu funcionamento; (ii) a construção da tabela de roteamento juntamente com a distribuição dos nós na rede; e (iii) a detecção para a tomada de decisão. A seguir, cada uma dessas etapas são descritas.

### 3.1. Divisão dos papéis

Para monitorar e gerenciar o ambiente, os papéis e a inteligência são distribuídos entre os nós (revisite a Figura 1) da rede, sendo eles: (i) nó sensor, (ii) nó decisor; e (iii) nó atuador. Neste caso, os nós sensores são distribuídos no ambiente para coletar e disseminar as informações (por exemplo, movimento, imagem, presença e temperatura), transmitindo-as para o nó decisor. Já o nó decisor recebe tais informações e realiza o processamento para detectar a tomada de decisão. Nesse caso, as informações são processadas no nó decisor. Ainda, o Nó decisor além de servir como interface para outras aplicações (característica presente em uma *smart home*), também é responsável por realizar a comunicação externa e possíveis atualizações vindas de fora da rede. Por fim, o nó atuador recebe a ação detectada pelo nó decisor e controla as aplicações (iluminação e equipamentos eletrodomésticos) do ambiente por meio de diferentes componentes de atuação, tais como chaves elétricas, relés, transistores e LEDs.

### 3.2. Construção da tabela de roteamento e a distribuição dos nós no ambiente

Como a nossa solução possui uma infraestrutura distribuída com diferentes papéis, a tabela de roteamento é construída com base na distância entre os nós e nos papéis de cada

nó. O processo de associação dos nós é iniciado quando os nós sensores/atuadores escutam os *beacons* enviados do nó decisor (Figura 2(a)). Para isso, quando um nó recebe uma mensagem, a força do sinal recebida (RSSI) por ele é utilizada para estimar a distância do nó que transmitiu a mensagem. Esse processo é realizado mediante um *handshake* de três vias, no qual os nós sensores/atuadores solicitam associação ao nó decisor que aceita as requisições.

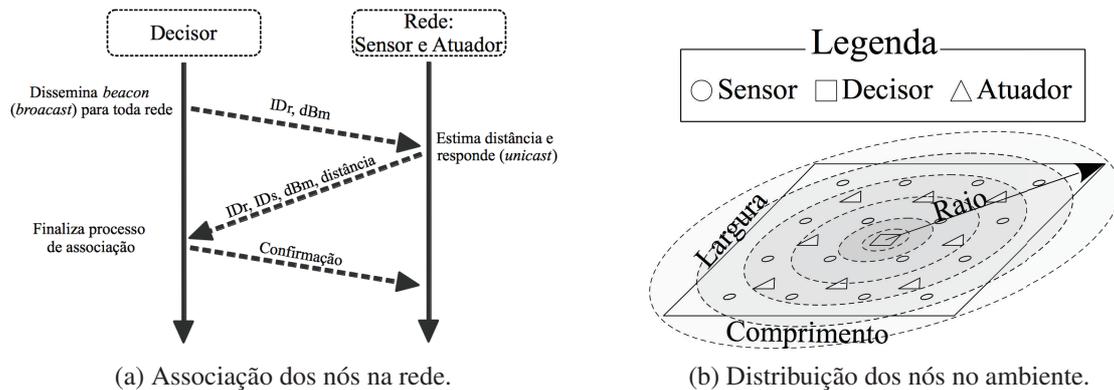


Figura 2. Procedimento para a construção da tabela de roteamento (Figura 2(a)) e distribuição dos nós no ambiente (Figura 2(b)).

Para cobrir toda área de coleta e disseminação de dados, os nós sensores são distribuídos de maneira equidistante. Assim, considerou a dimensão da área monitorada (isto é, largura  $L$  e comprimento  $C$ ) e o raio ( $R$ ) de comunicação do nó sensor. Com isso, é possível definir a quantidade de nós sensores para serem distribuídos na área:  $\lceil \frac{L}{R} \rceil \lceil \frac{C}{R} \rceil$ . Já a distribuição dos nós atuadores é a metade dos nós sensores, uma vez que é realístico admitir que há menos nós atuando no ambiente e mais nós disseminando informações. Esse procedimento é ilustrado na Figura 2(b).

Destaca-se que o nó decisor é munido com um maior poder de comunicação para alcançar todos os nós sensores/atuadores na rede, revise a Figura 2(b). Como resultado, o nó decisor é responsável por toda região de detecção e atuação. Dessa forma, com apenas um salto, o nó decisor pode receber as informações e repassar as ações para toda a rede. Isso é uma realidade razoável de supor em um ambiente residencial, no qual os equipamentos estão próximos fisicamente. Consequentemente, o nó decisor pode construir um conhecimento local sobre a área monitorada, sem a necessidade de múltiplos saltos. Portanto, a nossa solução permite a criação de uma RSASF para sensorar e atuar no processo de decisão de forma autônoma dentro da rede. O processo para realizar a tomada de decisão é descrita na próxima Subseção 3.3.

### 3.3. Detecção para o processo de tomada de decisão

Para realizar o processo de tomada de decisão, é necessário detectar e classificar as preferências do morador em um ambiente residencial. Destaca-se, entretanto, que tal processo não é uma tarefa trivial, uma vez que é fundamental tratar e correlacionar informações qualitativas e quantitativas, como nível de iluminação/temperatura e quantidade de pessoas no ambiente. Para tratar tal problema, o modelo proposto para a tomada de decisão tem como objetivo o aprendizado das aplicações mediante técnicas de inteligência computacional.

Em razão do exposto anteriormente, foram explorados cinco algoritmos de classificação clássicos da literatura para o processo de tomada de decisão, sendo eles: (i) Árvore de Decisão (ii) Naive Bayes; (iii) K-Nearest Neighbors (KNN); (iv) Rede Neural Artificial do tipo MultiLayer Perceptron (RNA); e (v) Support Vector Machine (SVM). Os algoritmos utilizam os dados providos dos nós sensores e, em seguida, detecta as características do ambiente de acordo com as preferências do morador, para realizar o processo de tomada de decisão.

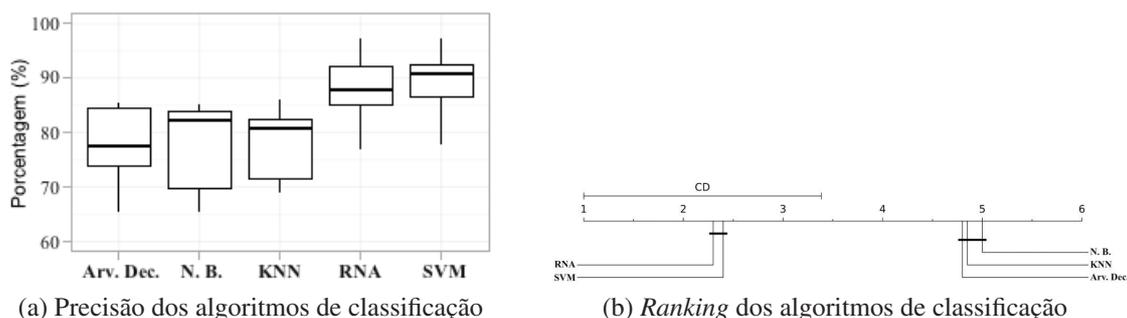


Figura 3. Análise exploratória dos algoritmos de classificação

Para saber qual algoritmo utilizar na solução proposta, realizou-se uma análise exploratória, como ilustrado na Figura 3. Para obter os modelos de classificação, utilizou-se os dados obtidos do protótipo (Seção 4). A Figura 3(a) apresenta a porcentagem dos resultados relativos à métrica precisão em função dos algoritmos de classificação, indicando o grau de dispersão dos resultados e os seus *outliers*. Já a Figura 3(b) fornece um *ranking* que permite determinar o desempenho geral de cada um dos algoritmos avaliados. Com base nesses resultados, nota-se que a RNA e SVM obtiveram os melhores resultados, quando comparado com os outros algoritmos. Apesar da RNA e SVM serem estatisticamente iguais e possuírem comportamentos semelhantes para a tomada de decisão devido à estabilidade na dispersão dos resultados (identificado pela amplitude interquartil do boxplot), a RNA possui uma melhor colocação no *ranking* segundo o *post-hoc test*. Pelos motivos supracitados, a RNA foi utilizada para realizar o processo de tomada de decisão.

#### 4. Protótipo construído

Uma das etapas desta pesquisa é coletar e disseminar os dados da casa do morador. Por isso, inicialmente, desenvolveu-se o protótipo do nó sensor, ilustrado na Figura 4(a), com poder de comunicação sem fio, na placa Intel Galileo. Na placa, integrou-se como módulo de comunicação o padrão 802.11, podendo ser extensível para o padrão 802.15.4. Além do módulo de comunicação, embarcou-se os sensores de temperatura, umidade, presença e luminosidade.

Para enviar os dados disseminados do nó sensor e transmiti-los para o nó atuador, foi desenvolvido o protótipo do nó decisor a partir da montagem de um Raspberry Pi, ilustrado na Figura 4(b). Com o intuito de realizar a orquestração da disseminação das informações presentes na rede, foi necessário expandir o uso do Raspberry Pi através dos padrões 802.11 e 802.15.4.. Dessa forma, o Raspberry Pi recebe os dados sensoreados, processa tais dados para a tomada de decisão e transmite para o nó atuador realizar a ação.

Para realizar a atuação, construímos o protótipo do nó atuador, apresentado na Figura 4(c). Tal protótipo possui a capacidade de receber ações para ligar ou desligar uma aplicação. Para este caso específico, há a necessidade do nó atuador estar conectado na tomada. Assim, adaptou-se o wattímetro Kill-a-Watt da empresa P3 com o módulo XBee (802.15.4) e o TRIAC para atuar no ambiente. O TRIAC é utilizado para atuar como chave eletrônica nos equipamentos. Além disso, foi adicionado um LED para informar, independente do tipo de atuação, que a ação foi realizada com êxito. Dessa forma, o protótipo desenvolvido permite a criação de uma RSASF que coleta dados, dissemina informações e atua na aplicação desejada.

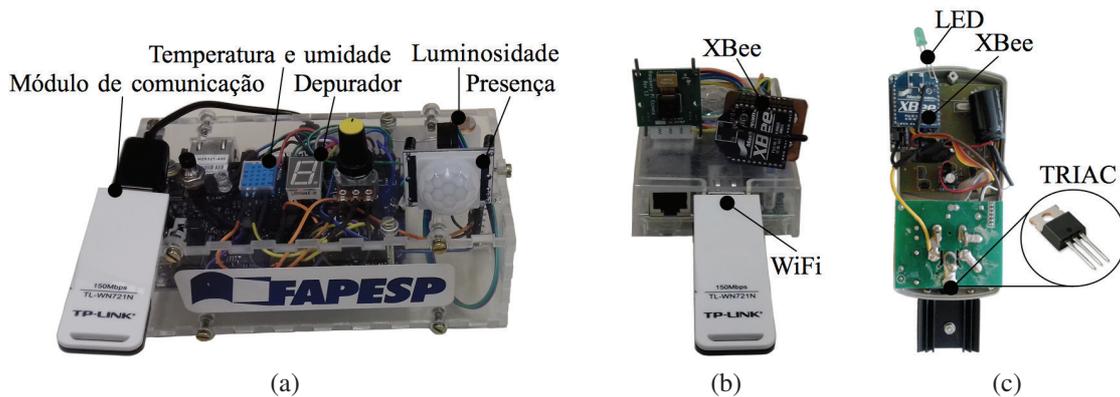


Figura 4. Protótipo do nó sensor (a), decisor (b) e atuador (c) desenvolvido para a criação de uma RSASF que coleta, dissemina, processa e atua na aplicação desejada.

## 5. Avaliação de Desempenho no Protótipo Construído

Nesta seção, o desempenho da nossa solução mediante o protótipo desenvolvido foi avaliado considerando dois cenários distintos, sendo eles: (i) cenário 1, no qual representa um ambiente residencial com baixa interferência, sendo assim, haverá outras redes, como ilustrado na Figura 5(a); e (ii) cenário 2, no qual representa um ambiente residencial com alta interferência (Figura 5(b)) e, por isso, foram adicionadas outras redes no mesmo canal de comunicação para promover uma maior interferência na rede. Destaca-se também, que as redes que foram adicionadas disseminam dados aleatoriamente entre 0 a 5s durante 1h. Esse intervalo foi escolhido empiricamente, pois quando aumentamos o tempo, o ambiente se comportava similar ao cenário 2.

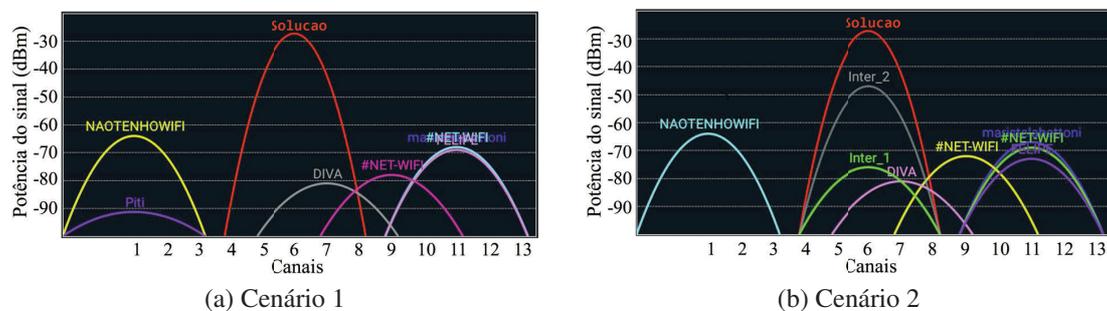


Figura 5. Intensidade do sinal das redes durante a execução dos experimentos.

As métricas utilizadas nas avaliações de desempenho foram: (i) taxa de acerto; (ii) atraso no processo de tomada de decisão; (iii) taxa de entrega; (iv) total de mensagem

disseminada; e (v) consumo de energia. Os resultados são apresentados na Figura 6 da Subseção 5.1, com um intervalo de confiança de 95%, replicados 30 vezes.

### 5.1. Impacto dos Resultados das Métricas no Protótipo Construído

A Figura 6(a) apresenta a taxa de acerto em atuar no processo de tomada de decisão em função dos cenários 1 e 2. Nota-se que o cenário 1 possui uma média ligeiramente maior que o cenário 2, apesar de ambos os cenários serem estatisticamente equivalentes. A equivalência faz sentido pois, a RNA utilizada no nosso modelo além de possuir a capacidade de generalizar o processo de decisão, também dispõe de adaptabilidade porque não é necessário alterar a topologia da rede a cada atualização.

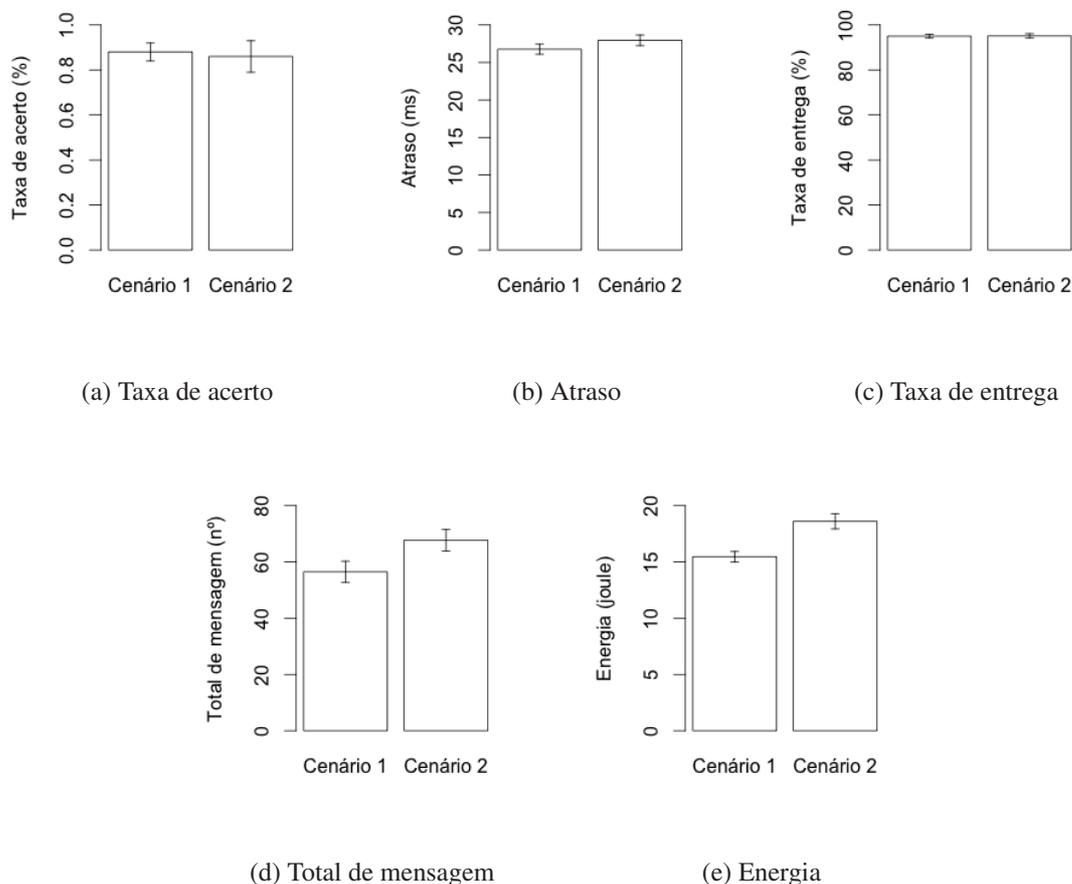


Figura 6. Análise de desempenho da solução proposta no protótipo construído.

Após validar a taxa de acertos, foi analisado o tempo gasto desde o sensoriamento até a atuação para que uma decisão seja executada, como ilustrado na Figura 6(b). Como era esperado, o cenário 2 apresenta um tempo de resposta ligeiramente maior quando comparado com o cenário 1. Isso ocorre em virtude da adição de novas redes no mesmo canal de comunicação. Tal adição gera mais transmissões de mensagens e, conseqüentemente, mais colisões e atraso na entrega do evento. Em outras palavras, pode haver perdas de informações. Apesar disso, não houve prejuízo na taxa de acertos para a tomada de decisão, como discutido na Figura 6(a).

Em relação a variável entrega, Figura 6(c), constatou que os cenários 1 e 2 são estatisticamente equivalentes, independente da interferência na rede. Em outras palavras, a taxa de entrega das mensagens possuem comportamentos semelhantes, não afetando assim no processo de tomada de decisão. Já a métrica total de mensagem disseminada (Figura 6(d)), tem como objetivo avaliar a eficiência da solução no que diz respeito ao tráfego de dados durante a disseminação das informações. Observou-se que o cenário 2 possui maior quantidade de mensagens disseminadas quando comparado com o cenário 1. Essa afirmação já era esperada, haja vista que o cenário com baixa interferência não influencia na disseminação dos eventos. Já o cenário com alta interferência, o qual possui outras redes no mesmo canal de comunicação, pode gerar colisões na disseminação dos eventos.

Por fim, a Figura 6(e) apresenta a variável consumo de energia para os cenários 1 e 2. Destaca-se que o cenário 2 possui médias ligeiramente maiores no consumo de energia em relação ao cenário 1. Isso ocorre devido ao aumento da quantidade de mensagem transmitida (revisite a Figura 6(d)), uma vez que é sabido que, o componente que mais dissipa energia residual do nó é a comunicação de dados. Ainda o processamento de outros componentes do circuito, devido ao total de mensagens no cenário 2, pode auxiliar tal consumo. Convém salientar, entretanto, que essa diferença do consumo de energia é pequena, aproximadamente 16%. Em virtude dos argumentos supracitados, é possível comprovar a eficácia da solução em dispositivos com recursos escassos, uma vez que mesmo em um cenário com altas interferências a solução se manteve estável com resultados bem próximos quando comparado à um cenário com baixa interferência.

## 5.2. Aplicabilidade da proposta

Nossa solução é focada em um primeiro momento nos sistemas residenciais inteligentes, entretanto pode ser aplicada em outros sistemas de automação, tais como predial, segurança e *Health Smart Homes*. Caso a nossa proposta utilize apenas a bateria como fonte de alimentação, consideramos que os nós sensores possuem mecanismos para preservar a sua energia residual, como proposto por [Filho et al. 2015b]. Com isso, é possível implantar a nossa proposta em qualquer lugar da residência ou em outro tipo de ambiente que tem a mesma finalidade, facilitando sua manutenção e instalação na parede, sem a necessidade de perfuração ou outra infraestrutura pré-existente.

O uso da nossa solução também pode ser utilizada para empresas fornecedoras de energia (por exemplo, AES Eletropaulo, Cemig, Coelba e Eletrobras), as quais desejam coletar o consumo de energia no setor residencial [Neto et al. 2017]. O uso das redes inteligentes nas residências dos consumidores, auxilia-os a procurar formas mais eficientes de conservar a energia da sua casa [Filho et al. 2014]. Portanto, pode-se utilizar nossa solução como uma infraestrutura de medição avançada, permitindo a comunicação entre a concessionária de energia elétrica e as instalações dos consumidores, e vice-versa. Assim, é possível comunicar com os consumidores, coletar o consumo de energia da sua residência, monitorar seus aparelhos elétricos e possivelmente controlar seu consumo de energia sem afetar seu conforto.

## 6. Conclusão

Como argumentado inicialmente, os HASs são fortemente dependentes da sua rede interna, visto que esta é a base de uma casa inteligente. Nesse contexto, o uso de uma

RSASF combinada com o paradigma de *fog computing* surge como uma solução promissora, ubíqua e de fácil implantação para ser utilizada como infraestrutura de controle em uma HAS. Entretanto, o uso das RSASFs e *fog computing* para monitorar e atuar como infraestrutura de controle dentro do contexto de uma HAS provoca novos desafios. Tais desafios remetem não apenas na aquisição de dados que muitas vezes são adquiridos de maneira implícita, mas também na falta de uma infraestrutura que acomode a heterogeneidade dos dispositivos. Além disso, existe a falta de interoperabilidade entre os dispositivos, o que recai no problema de escalabilidade e robustez no processo para tomadas de decisões.

Com isso em mente, este artigo propôs uma solução inteligente para um ambiente residencial que, além de manter uma precisão no processo de tomada de decisão, tem como objetivo melhorar a robustez no processamento, reduzindo a latência de serviço em dispositivos com recursos escassos. Como prova de conceito, desenvolveu-se um protótipo baseado nas características de uma RSASF para validar a viabilidade da proposta. Os resultados reais obtidos das avaliações de desempenho, mostraram ser promissores independentes do ambiente está com baixa ou alta interferência, sendo dois deles notáveis: (i) alta taxa de acertos com baixo atraso no processo de tomada de decisão; e (ii) eficiência na disseminação da informação com baixo consumo de energia.

Como trabalhos futuros, planeja-se além de ampliar o estudo apresentado neste artigo, desenvolver soluções sensíveis ao contexto de maneira individualizada para os sistemas residências. Para isso, será utilizado sensores de imagem para identificar o usuário e, em seguida, detectar qual morador terá prioridade no processo de tomada de decisão.

**Agradecimentos:** Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro concedido da FAPESP (processo 2014/06330-5) para o bolsista de doutorado MSc. Geraldo P. R. Filho.

## Referências

- Akyildiz, I. F. and Kasimoglu, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2(4):351 – 367.
- Bonomi, F., Milito, R., Natarajan, P., and Zhu, J. (2014). *Fog Computing: A Platform for Internet of Things and Analytics*, pages 169–186. Springer International Publishing, Cham.
- Cheng, J. and Kunz, T. (2009). A survey on smart home networking. *Carleton University, Systems and Computer Engineering*.
- Coutinho, A. A. T. R., Carneiro, E. O., and Greve, F. G. P. (2016). Computação em névoa: Conceitos, aplicações e desafios. pages 266 – 315.
- Dittawit, K. and Aagesen, F. (2013). Architecture and functional framework for home energy management systems. In Bauschert, T., editor, *Advances in Communication Networking*, volume 8115 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 173–184. Springer Berlin Heidelberg.
- Farias, C., Pirmez, L., Delicato, F., Soares, H., Dos Santos, I., and Carmo, L. (2013). A control and decision system for smart buildings. In *Ubiquitous Intelligence and Computing, 2013 IEEE 10th International Conference on and 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (UIC/ATC)*, pages 254–261. IEEE.

- Farias, C., Soares, H., Pirmez, L., Delicato, F., Santos, I., Carmo, L. F., Souza, J., Zomaya, A., and Dohler, M. (2014). A control and decision system for smart buildings using wireless sensor and actuator networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 25(1):120–135.
- Filho, G., Ueyama, J., Faical, B., Guidoni, D., and Villas, L. (2015a). Residi: An intelligent decision platform for residential infrastructure using wireless sensors and actuators. In *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2015 XXXIII Brazilian Symposium on*, pages 237–245.
- Filho, G. P. R., Ueyama, J., Faical, B. S., Pessin, G., d. Farias, C. M., Pazzi, R. W., Guidoni, D. L., and Villas, L. A. (2015b). An energy-aware system for decision-making in a residential infrastructure using wireless sensors and actuators. In *Network Computing and Applications (NCA), 2015 IEEE 14th International Symposium on*, pages 9–16.
- Filho, G. P. R., Ueyama, J., Villas, L., Pinto, A., and Seraphini, S. (2013a). Nodepm: Um sistema de monitoramento remoto do consumo de energia elétrica via redes de sensores sem fio. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), editor, Sociedade Brasileira de Computação (SBC)*, 31:17–30.
- Filho, G. P. R., Ueyama, J., Villas, L. A., Pinto, A., Gonçalves, V. P., and Seraphini, S. (2013b). An intelligent approach for improving energy efficiently in smart grids. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*, page 1. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp).
- Filho, G. P. R., Ueyama, J., Villas, L. A., Pinto, A. R., Goncalves, V. P., Pessin, G., Pazzi, R. W., and Braun, T. (2014). Nodepm: A remote monitoring alert system for energy consumption using probabilistic techniques. *Sensors*, 14(1):848.
- G1 (2014). Economia - brasil registra 181 apagoes desde 2011. <http://g1.globo.com/economia/noticia/2014/02/brasil-registra-181-apagoes-desde-2011-diz-levantamento.html>.
- Jiang, L., Liu, D.-Y., and Yang, B. (2004). Smart home research. In *Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on*, volume 2, pages 659–663, Shanghai. IEEE.
- Khalid, M., Yousaf, M. M., Iftikhar, Y., and Fatima, N. (2016). Establishing the state of the art knowledge domain of cloud computing. In *Advanced Computer and Communication Engineering Technology*, pages 1001–1014. Springer.
- Khan, M., Silva, B. N., and Han, K. (2016). Internet of things based energy aware smart home control system. *IEEE Access*, 4:7556–7566.
- Lee, J. H., Lee, H., Kim, M. J., Wang, X., and Love, P. E. (2014). Context-aware inference in ubiquitous residential environments. *Computers in Industry*, 65(1):148 – 157.
- Mahmood, A., Khan, I., Razzaq, S., Najam, Z., Khan, N., Rehman, M., and Javaid, N. (2014). Home appliances coordination scheme for energy management (hacs4em) using wireless sensor networks in smart grids. In *Procedia Computer Science*, volume 32, pages 469 – 476. Elsevier.

- Maia, P., Baffa, A., Cavalcante, E., Delicato, F. C., Batista, T., and Pires, P. F. (2015). Uma plataforma de middleware para integração de dispositivos e desenvolvimento de aplicações em e-health. pages 361 – 374.
- Mano, L. Y., Faiçal, B. S., Nakamura, L. H., Gomes, P. H., Libralon, G. L., Meneguete, R. I., Filho, G. P., Giancristofaro, G. T., Pessin, G., Krishnamachari, B., and Ueyama, J. (2016). Exploiting iot technologies for enhancing health smart homes through patient identification and emotion recognition. *Computer Communications*, 89–90:178 – 190. Internet of Things: Research challenges and Solutions.
- Mantoro, T., Ayu, M. A., and Elnour, E. E. (2011). Web-enabled smart home using wireless node infrastructure. In *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia*, MoMM'11, pages 72–79, New York, NY, USA. ACM.
- Mekikis, P.-V., Athanasiou, G., and Fischione, C. (2013). A wireless sensor network test-bed for event detection in smart homes. In *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2013 IEEE International Conference on*, pages 321–322, Cambridge. IEEE.
- Mineno, H., Kato, Y., Obata, K., Kuriyama, H., Abe, K., Ishikawa, N., and Mizuno, T. (2010). Adaptive home/building energy management system using heterogeneous sensor/actuator networks. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE*, pages 1–5.
- Ming, A., Luo, H., Ren, Y., Pang, Z., and Tsang, K. F. (2016). A energy efficient multi-dimension model for system control in smart environment systems. In *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, pages 946–949.
- Neto, J. R., Boukerche, A., Yokoyama, R. S., Guidoni, D. L., Meneguete, R. I., Ueyama, J., and Villas, L. A. (2017). Performance evaluation of unmanned aerial vehicles in automatic power meter readings. *Ad Hoc Networks*, 60:11 – 25.
- Orestis, A., Dimitrios, A., Dimitrios, D., and Ioannis, C. (2013). Smart energy monitoring and management in large multi-office building environments. In *Proceedings of the 17th Panhellenic Conference on Informatics*, pages 219–226, New York, NY, USA. ACM.
- Ramlee, R., Othman, M., Leong, M., Ismail, M., and Ranjit, S. (2013). Smart home system using android application. In *Information and Communication Technology (ICoICT), 2013 International Conference of*, pages 277–280, Bandung. IEEE.
- Siano, P., Graditi, G., Atrigna, M., and Piccolo, A. (2013). Designing and testing decision support and energy management systems for smart homes. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 4(6):651–661.