

CONDE: Um Sistema de Controle e Decisão para Edifícios Inteligentes usando Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio

Henrique R. dos S. Soares, Luci Pirmez, Flávia C. Delicato, Claudio M. de Farias

Programa de Pós-Graduação em Informática – Instituto Tércio Paccitti / Instituto de Matemática – Universidade Federal do Rio de Janeiro

{henriqueribeiro, luci.pirmez, flavia.delicatto, claudiomiceli}@labnet.nce.ufrj.br

Resumo. *Uma forma de melhorar a eficiência energética de edifícios inteligentes (Smart Buildings) é aplicar mecanismos de controle e decisão aos dispositivos do edifício a fim de automatizar a operação dos mesmos. Outra forma é distribuir esses mecanismos entre os nós de uma rede de atuadores e sensores sem fio (RASSF). Este trabalho propõe um sistema descentralizado de controle e decisão para aplicações de edifícios inteligentes que fazem uso de RASSF chamado CONDE. Os testes demonstram que, como as grandezas monitoradas não são transmitidas para uma entidade centralizadora, há um ganho em tempo de resposta, de forma que a decisão é aplicada mais rapidamente, economizando tempo e energia, tanto da rede quanto do edifício.*

Abstract. *One way to improve the energy efficiency of Smart Buildings is applying mechanisms for control and decision on devices of the building in order to automate their operation. Another way is to distribute these mechanisms among the nodes of a wireless sensors and actuators network (WSAN). This work proposes a distributed system for decision and control for Smart Building applications that make use of a WSAN called CONDE. Tests have shown that as data is not transmitted to a centralizing station, there is a response time gain, so the decision is applied sooner, saving time and energy from the network and the building.*

1. Introdução

A degradação ambiental e o aquecimento global estão entre os maiores desafios enfrentados atualmente. Tais desafios são alvos de intensa pesquisa e investimentos por organizações governamentais e privadas na busca de estratégias para minimizar a emissão de gases poluentes e para tornar mais eficiente o consumo de energia.

Um dos campos de pesquisa no uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) como provedoras de soluções para os desafios ambientais é o edifício inteligente (*Smart Building*). Segundo [Schor et al 2009], edifícios inteligentes são equipados com dispositivos inteligentes instalados de forma a minimizar o consumo de energia sem comprometer o conforto e a segurança do usuário. Portanto, um passo importante rumo a um estilo de vida sustentável é melhorar a eficiência energética dos edifícios. Embora os avanços recentes no campo da ciência dos materiais tenham conseguido reduzir o consumo diretamente na estrutura dos edifícios, por exemplo, através do uso de materiais que absorvem menos calor no revestimento externo do edifício, ainda há problemas a serem superados. Um deles relaciona-se à grande quantidade de energia desperdiçada pelo uso indiscriminado de diversos equipamentos,

tais como os aparelhos de controle de temperatura e de iluminação. Nesse sentido, aplicações para edifícios inteligentes apresentadas na literatura buscavam reduzir o desperdício de energia de diversos equipamentos. Exemplos dessas aplicações são: aplicações de controle de temperatura; aplicações de iluminação; de qualidade do ar e de controle de janelas; aplicações de desligamento de dispositivos; aplicações de segurança de pessoas (controle de acesso) e de dispositivos (proteção contra furto). Tais aplicações frequentemente monitoram grandezas físicas extraídas do ambiente, como luz, vibração, temperatura, presença, componentes químicos (fumaça ou gases) e voltagem. Entretanto, a maioria destes trabalhos aponta soluções centralizadas de controle e monitoramento que usam sensores analógicos cabeados [Shu et al 2009].

Recentemente, os autores de [Schor et al 2009] e [Liu et al 2010] apresentaram soluções de controle e monitoramento voltadas para edifícios inteligentes que fazem uso de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). As RSSFs são compostas por dispositivos de baixo custo, com fonte de energia e capacidades computacionais limitadas, dotados de capacidades de sensoriamento e comunicação sem fio. Elas são compostas por um grande número de nós sensores, frequentemente da ordem de centenas ou milhares, que atuam de forma colaborativa com a finalidade de monitorar determinado ambiente. Nas propostas encontradas na literatura para essas aplicações, as RSSFs são utilizadas apenas como infraestrutura de sensoriamento e de comunicação para transmitir os dados coletados pelos sensores para uma entidade central, um servidor, onde se localiza todo o processo de controle e decisão das aplicações.

Apesar do uso crescente das RSSFs em edifícios inteligentes, sensores são dispositivos passivos, altamente limitados em recursos, que basicamente coletam e transmitem dados, mas não atuam no ambiente. Por outro lado, as Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio (RASSF) incluem nós atuadores, que são dispositivos com menos restrições do que um nó sensor, que podem realizar tarefas mais complexas, as quais exigem maior poder computacional e têm maior custo energético, além de poderem atuar ativamente no ambiente físico, em resposta a situações indicadas pelos dados coletados pelos nós sensores [Liu et al 2010]. São exemplos de ações que podem ser realizadas pelos atuadores: a alteração do termostato de um ar-condicionado em função do número de pessoas em uma sala, o desligamento de lâmpadas em ambientes vazios ou a ativação de ventiladores quando a qualidade do ar é considerada inadequada.

O objetivo desse trabalho é propor um sistema de controle e decisão descentralizado para aplicações voltadas para edifícios inteligentes, denominado CONDE, que utilizam RASSFs. Na proposta, a RASSF é utilizada para realizar a coleta e a manipulação de informações dos edifícios, bem como para realizar, dentro dos próprios nós da rede, a tomada de decisões sobre ações referentes às aplicações. Além disso, o sistema CONDE permite, dentro da RASSF, integrar diferentes aplicações, possibilitando compartilhamento de dados de monitoramento.

A distribuição do processo de controle e decisão das aplicações entre os nós sensores e atuadores é uma forma de melhorar a eficiência energética dos edifícios inteligentes. Esta melhora se verifica, dentre outros fatores, pela proximidade entre os locais onde a decisão é tomada e onde ela é executada. Assim, como as grandezas monitoradas não são transmitidas para uma entidade centralizadora, há um ganho em tempo de resposta, de forma que a decisão é aplicada mais rapidamente, economizando energia da rede e do edifício. Obviamente, ao se retirar as tarefas de controle e decisão

das aplicações da entidade centralizadora e incorporá-las à RASSF, surgem novos desafios. Um desafio chave é maximizar o tempo de vida da RASSF enquanto se mantêm suas funcionalidades para as aplicações de edifício inteligente [Shu et al 2009].

Os diferenciais da solução proposta em relação às demais existentes na literatura são: (i) a distribuição do processo de controle e decisão das aplicações entre os nós sensores e atuadores; e (ii) a reutilização de medições por parte das aplicações que estão em operação e que utilizam os mesmos tipos de sensores, resultando assim em economia no consumo de energia da RASSF também na fase de sensoriamento. O restante deste trabalho está dividido como segue: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. As Seções 3 e 4 apresentam respectivamente o sistema CONDE e os resultados obtidos nos experimentos conduzidos com o mesmo. Finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Vários trabalhos na literatura apresentam propostas para eficiência energética de edifícios inteligentes. Muitos deles, entretanto, apresentam soluções para apenas uma aplicação. Por exemplo, trabalhos descritos em [Agarwal et al 2010], [Mohamaddoust et al 2010] e [Yeh et al 2010]. Outros trabalhos, como [Erickson et al 2009], [Schor et al 2009], [Filipponi et al 2010] e [Liu et al 2010], apesar de serem capazes de controlar mais de uma aplicação, fazem uso da RSSF como infraestrutura de comunicação para transmitir os dados coletados pelos sensores para uma entidade central dos edifícios inteligentes, não aproveitando sua capacidade, ainda que reduzida, de processamento paralelo. Diferentemente desses trabalhos, a presente proposta coloca o mecanismo de controle e decisão descentralizado *dentro* da rede, valendo-se da capacidade de processamento dos nós e, desta forma, verifica-se uma economia de energia, tanto da rede quanto do edifício, conforme os experimentos realizados (ver seção 4). Isto se deve, dentre outros fatores, pela proximidade entre os locais onde a decisão é tomada e onde ela é executada. Assim, como as grandezas monitoradas não são transmitidas para uma entidade centralizadora, há um ganho em tempo de resposta e, conseqüentemente, se economiza tempo e energia de transmissão de mensagens.

O trabalho de [Erickson et al 2009] apresenta uma prova de conceito de um sistema simples que coleta dados de uma RSSF de micro-câmeras por determinado período a fim de criar, em um computador fora da rede, modelos de predição da ocupação do edifício para ajustar o controle de uma aplicação AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). Estes modelos de predição podem, em trabalhos futuros, ser usados para ajustar o funcionamento de qualquer aplicação em um edifício inteligente. O principal diferencial do sistema de controle e decisão proposto é que a ação do mesmo ocorre em tempo real, aumentando a economia de energia no edifício.

Em [Schor et al 2009], a aplicação proposta para edifícios inteligentes faz uso de uma RSSF para coletar dados e transmiti-los quando solicitados através de um Serviço Web (*Web Service*). Cada nó sensor tem um endereço IP único na rede e implementa um mini servidor HTTP que usa os protocolos IPv6, TCP e HTTP. O sistema de controle e decisão é comandado por regras simples orientadas a eventos. Em [Filipponi et al 2010] é apresentada uma proposta de arquitetura baseada em eventos para monitoramento de espaços públicos com sensores heterogêneos em cidades inteligentes. O objetivo do trabalho é prover um arcabouço para a implementação de serviços de

monitoramento de áreas públicas e infraestruturas quaisquer. A arquitetura proposta utiliza o paradigma publicação/subscrição, onde elementos chamados *Knowledge Processors* (KPs) podem produzir e consumir notificações de eventos. Estas notificações são produzidas por um observador de um evento e descrevem este evento. Elas podem ser grandezas sensoreadas ou um comando a ser executado. As notificações são distribuídas para outros KPs que se inscreveram neste tipo de evento através dos *Semantic Information Brokers* (SIBs) e estes as repassam para as aplicações. Este trabalho prevê a utilização de RASSF para monitoramento de grandezas físicas, entretanto os nós sensores não fazem nenhum dos papéis descritos, mas enviam os dados coletados para fora da RASSF, na qual há um KP que interpreta estes dados, cria uma notificação de evento e a publica.

Finalmente, em [Liu et al 2010] é proposta uma aplicação para controle de sistemas de iluminação e do estado de equipamentos e estruturas, como janelas, por exemplo. Essa proposta utiliza dois componentes principais. O primeiro é responsável pelo monitoramento de eventos físicos no ambiente por meio de uma RASSF. O outro componente, que está fora da rede, é responsável pelo tratamento dos dados vindos do primeiro componente (agregações e avaliações quanto à qualidade) e contém os mecanismos de controle e decisão. Baseada nos dados de entrada fornecidos pela RASSF, a aplicação proposta é capaz de: disparar alarmes caso alguma medição ultrapasse um determinado limiar; monitorar o total de recursos utilizados por um usuário ou aplicação; determinar quais são os computadores disponíveis em um laboratório; e determinar a localização de um visitante no edifício, guiando-o até seu destino.

Diferentemente dos trabalhos de [Liu et al. 2010], [Erickson et al. 2010], [Schor et al. 2009] e [Fillipponi et al 2010], o sistema CONDE é descentralizado e realizado na íntegra pelos nós da RASSF, trazendo as vantagens inerentes de tempo de resposta e economia de energia, tanto do edifício quanto da rede em si (dessa forma maximizando seu tempo de vida operacional).

3. CONDE – Sistema de Controle e Decisão para edifícios inteligentes

3.1. Arquitetura Lógica do CONDE

A arquitetura lógica do CONDE (Figura 1) consiste de quatro componentes de software (Gestor de Decisão, Gestor de Monitoramento, Gestor de Atuação e Gestor da RASSF), do subsistema de Inferência, que contém o componente Método de Inferência e a base de dados Parâmetros de Inferência, e, finalmente, da base de dados Aplicações. As bases de dados são especificadas como arquivos XML, um para cada base. Elas são criadas e têm os dados inseridos nas mesmas em um momento anterior à fase de inicialização da RASSF sendo ativadas durante esta fase, antes da operação propriamente dita do sistema de decisão.

O Gestor de Decisão é o componente central da arquitetura e é responsável por gerenciar o funcionamento dos outros componentes e subsistemas e por coordenar as ações executadas no ambiente monitorado. Também é responsável por agrupar (por aplicação) os dados enviados pelo Gestor de Monitoramento e enviar as decisões inferidas para o Gestor de Atuação. Para realizar o agrupamento, o Gestor de Decisão consulta a base de aplicações, que contém dados sobre os parâmetros das aplicações, tais como seus identificadores, tipos de sensores utilizados e a periodicidade com que o

processo de decisão de cada aplicação é disparado. A periodicidade da coleta e do envio de informações para o Gestor de decisão é dada no componente de monitoramento.

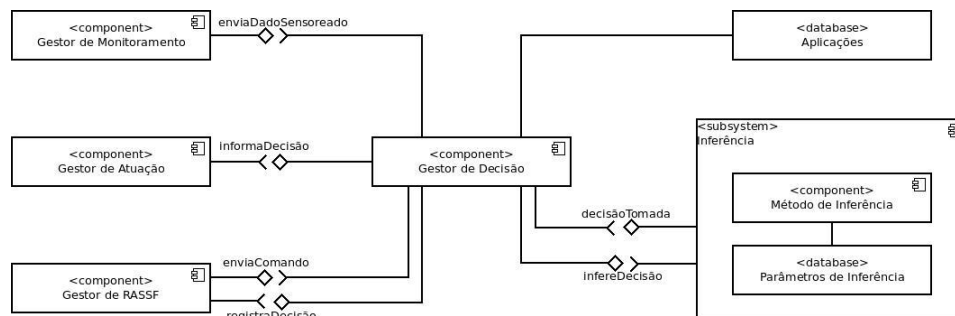


Figura 1. Diagrama UML de componentes da arquitetura lógica do sistema.

O Gestor de Monitoramento coordena as tarefas de monitoramento dos dados físicos do ambiente, ou seja, este componente deve estar, obrigatoriamente, localizado em um dispositivo físico capaz de realizar o sensoriamento. O componente constitui basicamente em uma API com o(s) dispositivo(s) de sensoriamento existente em um nó sensor. Cada nó pode ter um ou mais dispositivos, capazes de sensoriar diferentes variáveis ambientais, como luz, temperatura, vibração, etc. É importante observar que diferentes aplicações podem solicitar a coleta de um mesmo tipo de dado, mas com periodicidades diferentes. Além disto, os dados físicos são coletados independentemente do seu valor semântico para as aplicações a que se destinam, ou seja, a leitura de um sensor de presença, por exemplo, indica apenas se há algo em movimento (pessoas, veículos etc.) em um determinado ambiente e não é associada a eventos de significado mais complexo, como: *há um intruso no ambiente*, ou *não se pode desligar a energia dos elevadores*. Este significado só é levado em conta durante o processo de inferência (Seção 4.2), momento em que este dado coletado é associado a uma aplicação.

O Gestor de Monitoramento envia periodicamente os dados coletados para o Gestor de Decisão. A fim de minimizar a quantidade de envios, o Gestor de Monitoramento armazena o último dado enviado de cada unidade de sensoriamento e compara cada nova leitura com este valor. Caso haja uma variação significativa entre o dado armazenado e a nova leitura, ou seja, se a diferença entre estas leituras ultrapassar o limiar determinado para este tipo de dado, este dado é enviado para o Gestor de Decisão. Caso contrário, ou seja, a diferença entre o dado armazenado e a nova leitura não seja considerada significativa, esta informação não é enviada, dessa forma economizando energia de transmissão.

O Gestor de Atuação gerencia a atuação do sistema sobre o ambiente monitorado, ou seja, é quem executa as decisões enviadas pelo Gestor de Decisão. Por motivo de eficiência energética da RASSF, este componente deve estar localizado em um dispositivo físico capaz de atuar no ambiente monitorado, os chamados *atuadores*. Os atuadores podem ser chaves elétricas, relés, LEDs, dentre outros, que por sua vez ativam/desativam lâmpadas, refrigeradores ou outros dispositivos presentes no edifício. Este componente recebe do Gestor de Decisão um identificador da aplicação e os valores de saída provenientes do componente de Inferência.

O Gestor da RASSF faz a comunicação entre a RASSF e redes externas. Este canal de comunicação serve para que, de fora da RASSF, seja possível monitorar a operação do sistema de decisão para fins de manutenção ou auditoria e para enviar

comandos para o Gestor de Decisão. O Gestor da RASSF atua como um gateway entre a rede externa e a RASSF, ou seja, não interpreta de mensagens recebidas, só as encaminha entre as redes. As mensagens recebidas são as decisões provenientes do Gestor de Decisão e os comandos recebidos de fora da RASSF.

O subsistema de Inferência, descrito em detalhes na Seção 3.3.1, é responsável por decidir, com base nos dados coletados do Gestor de Monitoramento e encaminhados pelo Gestor de Decisão, quais ações serão executadas pelo Gestor de Atuação.

3.2. Arquitetura Física do Sistema de Decisão para Edifícios Inteligentes

Neste trabalho, considera-se uma RASSF composta por diversos nós sensores, nós atuadores e uma estação base. Nós sensores podem assumir dois papéis na rede: (i) Nó Sensor Decisor (NSD); e (ii) Nó Sensor Ordinário (NSO). Os nós atuadores e a estação base podem assumir um único papel, Nó Atuador (NAT) e Nó Estação Base (NEB). Papéis dizem respeito às responsabilidades de cada nó e suas funcionalidades. A possibilidade de se usar apenas um papel para os nós sensores foi considerada neste trabalho. Em tal cenário, nós sensores seriam responsáveis pelo monitoramento, inferência e gestão de decisões do sistema proposto. A fim de manter a cobertura de sensoriamento sobre todo o ambiente monitorado, nós sensores deveriam compartilhar os dados sensoreados entre si, de forma que todos os nós recebessem estes dados. De posse da mesma massa de dados, todos os nós sensores tomariam decisões idênticas em seus processos de inferência e transmitiriam ações repetidas para os Gestores de Atuação. Devido a estas repetições, este cenário é ineficiente em relação à energia gasta na RASSF. Já no cenário com dois papéis, apenas um nó sensor seria responsável pela inferência e gestão de decisões e os demais pelo monitoramento. Os nós responsáveis pelo monitoramento enviam os dados sensoreados para o nó responsável pela inferência e gestão de decisões, que realiza o processo de inferência uma única vez e transmite ações apenas uma vez. Como o processo de inferência é realizado em apenas um nó sensor e as ações são transmitidas uma só vez, há uma diminuição significativa de processamento e de dados transmitidos.

Os componentes de software foram implantados nos dispositivos físicos como apresentado a seguir. O NSD contém o componente *Gestor de Decisão*, a base de dados *Aplicações* e o subsistema *Inferência*. NSO, NAT e NEB contém apenas um único componente, Gestor de Monitoramento, Gestor de Atuação e Gestor da RASSF, respectivamente. NSOs são os nós sensores em que estão localizadas as unidades de sensoriamento e contêm o Gestor de Monitoramento. Eles coletam os dados do ambiente monitorado e os enviam via rádio de acordo com as regras do componente Gestor de Monitoramento. NSDs são nós sensores que não precisam ter unidades de sensoriamento. Eles recebem os dados monitorados dos NSOs, tomam decisões e as transmitem para os NATs, para que sejam executadas no ambiente monitorado, e para o NEB, para fins de manutenção e auditoria do sistema. Além disto, os NSDs podem receber comandos vindos de fora da RASSF pelo NEB. NATs são nós atuadores, que só recebem as mensagens enviadas pelos NSDs e as executam. NEB é uma estação base que, conforme explicado, recolhe os dados enviados pela RASSF e é capaz de enviar comandos para os NSDs vindos de fora da RASSF.

3.3. Funcionamento do Sistema de Decisão

O funcionamento do sistema CONDE é dividido em duas fases. Na primeira, chamada *inicialização*, são determinados os parâmetros de funcionamento do sistema. É

nesta fase que as bases de dados são criadas e os dados necessários ao funcionamento do sistema são inseridos nas mesmas, isto é, são definidas as aplicações utilizadas no edifício inteligente em que a RASSF será implantada, são configurados/inicializados os parâmetros destas aplicações e é definido o método de inferência, bem como seus respectivos parâmetros. As informações sobre as aplicações e seus parâmetros já estão na memória. Os sensores ativados dependem da aplicação. Por fim as aplicações são escolhidas antes da fase de inicialização do sistema.

A segunda fase consiste no ciclo de *operação* do sistema. Nessa fase, para cada aplicação, o Gestor de Decisão dispara um conjunto de procedimentos. Inicialmente, o Gestor de Decisão recebe do Gestor de Monitoramento os dados coletados pelas unidades de sensoriamentos e associa estes dados às aplicações. No estudo de caso em questão, estão associadas à *aplicação AVAC*, as unidades de sensoriamento que monitoram temperatura e presença de pessoas, à aplicação *Controle de Iluminação*, as que monitoram luminosidade, presença de pessoas e estado dos equipamentos, à aplicação *Controle da Qualidade do Ar*, as que monitoram presença de fumaça e de pessoas e estados dos equipamentos e à aplicação *Monitoramento de Equipamentos*, as que monitoram presença de pessoas e estado de equipamentos. O componente Gestor de Monitoramento coleta estes dados, independentemente de aplicação, e os envia para o Gestor de Decisão. Em seguida, esses dados coletados são agrupados por aplicação e enviados para o subsistema Inferência (seção 3.3.1), o qual os processa e toma as decisões cabíveis para cada aplicação separadamente, como, por exemplo, "caso não haja pessoas em uma sala não é necessário ajustar a temperatura", ou "caso a luminosidade natural de um ambiente diminua deve-se intensificar a iluminação artificial". Tomadas estas decisões, o subsistema Inferência envia uma mensagem para o Gestor de Decisão informando o resultado da sua decisão associando o identificador da aplicação com tal resultado. Por exemplo, no caso da aplicação de AVAC, esta mensagem contém o identificador da aplicação e um valor que indica a variação de temperatura que o termostato deve ajustar a fim de atingir a temperatura ideal e outro valor que indica a intensidade em que o sistema de ventilação deve funcionar. Neste momento, de posse dos dados recebidos do subsistema Inferência, o Gestor de Decisão vai enviá-las junto às decisões tomadas no subsistema Inferência para o Gestor de Atuação e o Gestor da RASSF. O Gestor de Atuação recebe os dados enviados pelo Gestor de Decisão indicando quais decisões devem ser executadas e gerencia a execução destas ações. O Gestor da RASSF recebe a mensagem enviada pelo Gestor de Decisão e a encaminha para fora da RASSF, registrando a ação executada e cuja finalidade é o controle do funcionamento e auditoria do sistema de decisão.

Além de todo este processo gerenciado pelo componente Gestor de Decisão, o Gestor da RASSF pode receber, de forma assíncrona, mensagens vindas de fora da RASSF. Estas mensagens são comandos enviados por um operador do sistema e são encaminhadas para o Gestor de Decisão. Este tipo de operação serve para ajustar a operação da RASSF. Exemplos de ajustes possíveis são: (i) modificar o intervalo de sensoriamento dos NSOs e (ii) ativar ou desativar uma determinada aplicação cujas bases de dados já estejam carregadas nos NSDs.

3.3.1. Descrição do Subsistema Inferência

O subsistema Inferência é responsável por processar os dados coletados e tomar decisões para cada aplicação ativa na RASSF. O *Método de Inferência* (detalhado na

seção 4.2) é quem define como os dados coletados serão processados a fim de tomar decisões nas aplicações ativas no sistema proposto. Estas decisões são tomadas com base em um conjunto de parâmetros e regras que regulam o processo de tomada de decisões em cada aplicação. Este conjunto de parâmetros e regras fica armazenado na base de dados Parâmetros de Inferência. Independente do método de inferência escolhido, a máquina de inferência se vale destes diferentes conjuntos de parâmetros e regras para avaliar os dados de cada aplicação.

A base de dados *Parâmetros de Inferência* (detalhado na seção 4.2) define a semântica das variáveis de entrada e saída do método de inferência escolhido, ou seja, somente a partir deste ponto o significado dos dados coletados é levado em conta e este significado depende da aplicação que o interpreta. As variáveis de entrada do Método de Inferência são os dados coletados pelas unidades de sensoriamento associados a cada aplicação. Por exemplo, na aplicação AVAC as variáveis de entrada são temperatura e presença de pessoas e as de saída são variação de temperatura e intensidade de ventilação. Assim, decisões tomadas na aplicação AVAC podem ajustar o termostato do ar condicionado a fim de atingir a temperatura considerada ideal, armazenada na base de dados Parâmetros de Inferência e/ou acionar a ventilação do ambiente com o mesmo propósito.

A arquitetura do subsistema Inferência é genérica, a fim de permitir que o sistema proposto possa utilizar qualquer método de inferência que se ache conveniente substituindo apenas o componente Método de Inferência e sua base de dados Parâmetros de Inferência. A única restrição imposta pelo sistema proposto é que este novo componente utilize uma interface de comunicação pré-definida. Esta interface exige que o componente Método de Inferência receba via comando os dados coletados e dispare um evento com as decisões tomadas. O comando de entrada deve receber uma dupla $\{A, M\}$ vinda do componente Gestor de Decisão, onde “A” é o identificador da aplicação em questão e “M” é o conjunto das variáveis de entrada desta aplicação, que são os dados coletados associados a esta aplicação, ordenados como estipulado pela base de dados Aplicações. O evento acionado pelo componente Método de Inferência deve conter a dupla $\{A, D\}$, onde “A” é o identificador da aplicação em questão e “D” é o conjunto de variáveis de saída desta aplicação, que simbolizam as decisões tomadas pelo subsistema de Inferência. O componente Método de Inferência e a base de dados Parâmetros de Inferência utilizados nos experimentos realizados neste trabalho serão detalhados na seção 4.2.

4. Avaliação Experimental do Sistema CONDE

Foram realizados quatro experimentos, dos quais todos foram simulados, exceto o terceiro, que, além do ambiente simulado, utiliza uma plataforma de sensores reais. No primeiro experimento é realizada a calibração do CONDE, de forma a medir o número ideal de NSOs por NSD implantado no edifício. O segundo busca avaliar o CONDE sob o aspecto de consumo de recursos, ou seja, visa determinar se é viável implantar o sistema em uma RASSF. O terceiro experimento tem como objetivo comparar os resultados obtidos na simulação com os obtidos em experimentos reais, a fim de validar os resultados simulados. Para esse experimento são utilizadas as métricas de avaliação descritas na seção 4.3. Finalmente, no quarto experimento, foi realizada uma comparação do sistema CONDE com a solução proposta em [Tsai et al 2008], que apresenta um sistema de controle e decisão centralizado, permitindo medir e comparar a

eficiência energética do edifício inteligente nas duas abordagens. Em todos os experimentos, duas aplicações foram consideradas: AVAC e iluminação. As unidades de sensoriamento utilizadas foram temperatura, luminosidade e presença. A atividade de atuação foi emulada pelo acendimento de LEDs nos atuadores, independentemente do tipo de ação a ser executada pelos mesmos.

4.1. Ambiente dos Experimentos

Nos experimentos tanto em ambiente real quanto simulado, a RASSF foi composta por sensores da plataforma MICAz. Os sensores foram programados no ambiente de desenvolvimento TinyOS, versão 2.1.1, usando a linguagem nesC. O TinyOS disponibiliza diversos componentes de software, incluindo os componentes que implementam a pilha de protocolos de comunicação. Os experimentos reais foram realizados em ambiente fechado e controlado (laboratório). Os experimentos simulados foram executados no simulador Avrora [Alberola 2011].

O CONDE foi implementado definindo-se cinco novos componentes para o TinyOS. Os componentes ManagerC, DecisionMakerC e MonitorC implementaram respectivamente as funcionalidades dos componentes Controle, Gestor de Decisão, Monitoramento. O subsistema de Inferência foi implementado em dois componentes do TinyOS denominados InferenceC e InferenceSystemC.

4.2. Sistema de Inferência e Base de parâmetros

O processo de inferência realizado pelo CONDE depende do método de inferência escolhido. Virtualmente qualquer método de inferência pode ser utilizado através da substituição do componente Método de Inferência por outro, desde que este implemente a mesma interface. A base de dados Parâmetros de Inferência é dependente do componente Método de Inferência, pois cada método de inferência utiliza os dados de forma distinta. Ela é preenchida durante a fase de inicialização.

Para a versão atual do CONDE, o método de inferência escolhido consiste no uso de bases de regras simples, uma para cada aplicação, em que o espaço de entrada é dividido em sub-espacos de tamanho fixo e a cada um destes são associadas decisões estáticas para a aplicação. Ou seja, para quaisquer valores de entrada pertencentes a um mesmo sub-espaco o sub-sistema de Inferência tomará sempre a mesma decisão. Para cada aplicação do edifício inteligente em operação na RASSF, há um conjunto de regras que é utilizado pelo subsistema de Inferência do CONDE, os quais consistem de parâmetros de entrada e decisões associadas e são armazenados na base de dados Parâmetros de Inferência. O CONDE toma decisões comparando os dados de entrada com os parâmetros presentes na base de dados. Se os dados de entrada satisfizerem as condições de uma determinada regra, a decisão associada a ela é transmitida para o Gestor de Decisão.

A base de dados Parâmetros de Inferência contém as variáveis de entrada e saída do sistema e suas regras. Uma variável tem um intervalo associado que determina os possíveis valores que esta pode assumir. Por exemplo: temperatura e presença estão associadas à aplicação de controle de AVAC, e podem estar nos intervalos $[0, 50]$ e $[0, 100]$, respectivamente. As variáveis de saída representam as possíveis ações que podem ser acionadas, como reduzir o termostato do ar-condicionado em um número determinado de graus. Assim, um exemplo de regra poderia ser:

- se (temperatura $\in [25,31.75[$) e (presença $\in [50,12.5[$) então (termostato $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$) e (ventilação $+25\%$)

4.3. Descrição dos Cenários, Experimentos e Métricas

Para os experimentos, adotou-se uma rede de topologia plana e com nós estáticos tanto para os testes reais quanto para os simulados. Cada experimento foi repetido 30 vezes, a fim de se obter um intervalo de confiança de 95%.

As métricas utilizadas para a avaliação do sistema de decisão foram: (i) **atraso do sistema de decisão**, definido como o tempo gasto entre o envio de uma mensagem do NSO até o recebimento de uma mensagem por um atuador; (ii) **energia consumida pelo edifício**, medida em kWh e avaliada através do consumo médio dos aparelhos e do intervalo de tempo durante o qual os mesmos estiveram ligados; (iii) **energia consumida pela rede**, medida através da ferramenta de análise de energia (*Energy Analysis Tool*) do simulador Avrora, que mede a energia gasta com processamento, transmissão e recebimento de pacotes, uso de LEDs e acessos à memória *flash*, e (iv) **eficiência do CONDE**, que é definida em termos de quantidade de acertos e de erros.

4.3.1. Experimento para calibração do CONDE

No primeiro experimento, simulações foram realizadas com o intuito de calibrar os parâmetros do Sistema CONDE de forma a encontrar a configuração ideal quanto ao tempo de resposta do sistema enquanto se minimiza o consumo de recursos da RASSF. Neste experimento variamos o número de NSOs, que enviam informações para um mesmo NSD, de 1 a 10 sensores, de forma a identificar o número ideal de NSOs por NSD em termos do tempo necessário para a coleta dos dados requeridos pelo subsistema Inferência. Os NSO foram dispostos aleatoriamente ao longo de uma área retangular 15x 15 m com o NSD tendo sido colocado no centro da área. Cada nó foi programado de forma a possuir uma identificação única e alcance de rádio omnidirecional fixo de 15 metros.

A Tabela 1 mostra o tempo requerido para que o NSD receba os dados necessários para a inferência para diferentes quantidades de NSOs por NSD. Os melhores resultados são obtidos para 4 (quatro) ou mais NSOs por NSD. Tal resultado decorre do uso de um buffer de sensoriamento do NSD, que deve ser preenchido completamente antes que qualquer processo de inferência possa ser iniciado. Este buffer foi criado a fim de evitar que leituras provenientes de um sensor defeituoso não comprometam a decisão a ser tomada. Isto significa que, ao capturar mais amostras, eliminamos possíveis erros de leitura através da redundância. Assim, para o sistema CONDE adotou-se como sendo quatro o número de NSOs no ambiente monitorado para cada NSD.

Tabela 1. Tempo necessário para que o NSD receba dos NSOs as informações necessárias ao processo de inferência

Sensores	1	2	3	4	5	7	9	10
Tempo (s)	79.219	40.164	40.159	20.637	20.637	20.637	20.637	20.637

4.3.2. Experimento para avaliar o consumo de recursos da RASSF

Neste segundo experimento são realizadas medições a fim de mensurar o impacto do CONDE sobre os sensores, tendo em vista suas limitações computacionais e de energia. Os sensores da plataforma MICAz, utilizados nos experimentos deste trabalho, são dotados de 4kB de memória RAM, 128 kB de memória flash para armazenamento do

programa e 512 kB para armazenamento de dados, e alimentados por duas pilhas AA (1202 mAh), que juntas contém aproximadamente 16000 J de energia [Krämer and Geraldly 2006]. A Tabela 2 mostra estatísticas de uso de CPU, da quantidade de memória RAM e *flash* utilizadas e de energia gasta pelos nós sensores e atuadores desempenhando cada um dos papéis em uso no CONDE. Pode-se observar que em nenhum dos dispositivos NAT, NEB, NSD e NSO o total de memória excede os 4 KB disponíveis. Apenas o NSD utiliza a memória flash de armazenamento, pois ele é quem armazena as bases de dados de Aplicações e Inferência. Além disto, a Tabela 2 mostra que os NATs permanecem 99,078% do tempo de simulação em estado de economia de energia, os NSDs, 97,774% e os NSOs, 98,578%, enquanto o NEB não entrou no estado de economia de energia. Esta diferença do NEB em relação aos outros papéis se dá em virtude do fato de que o NEB tem uma interface serial. Esta interface fica sempre ativa, logo a CPU fica em estado inativo (*idle*), que gasta mais energia que o estado de economia de energia (*sleep*), mas fornece uma fonte de energia alternativa pelo cabo serial para este sensor. Como o NEB tem uma fonte de energia alternativa, seu tempo de vida fica virtualmente infinito e não restrito a carga da bateria.

Tabela 2. Recursos consumidos por cada tipo de papel presente no CONDE

Sensores	NAT	NEB	NSD	NSO
Memória RAM utilizada	7,495%	54,199%	74,576%	10,913%
Memória flash para programa utilizada	10,057%	23,804%	38,895%	12,981%
Memória flash para armazenamento utilizado	0%	0%	25,195%	0%
Tempo de CPU em estado ativo	0,243%	0,594%	0,743%	0,566%
Tempo de CPU em estado inativo (<i>idle</i>)	0,679%	99,406%	1,483%	0,856%
Tempo de CPU em estado de economia de energia	99,078%	0,0%	97,774%	98,578%
Energia gasta (1 hora)	7,719 J	37,517 J	15,820 J	11,924 J
Tempo máximo de vida	2072,807 h	—	1011,378 h	1341,832 h

Quanto ao tempo máximo de vida da RASSF, ele fica restrito ao tempo de vida do NSD, pois este é o único papel fundamental para o funcionamento do sistema, ou seja, se um NAT, NEB ou NSO falha por falta de energia ou qualquer outro motivo, o funcionamento do sistema não é comprometido; porém se o NSD falha o sistema para de funcionar na área coberta por este NSD. Portanto, o tempo máximo de vida do CONDE pode ser calculado como o tempo de vida dos nós NSD, que é de 1011,378 horas ou 42,14 dias de funcionamento ininterrupto. Se o funcionamento do CONDE ficar mais restrito, como durante o horário de expediente, por exemplo, este tempo máximo de vida tende a aumentar.

4.3.3. Experimento com sensores reais

Este experimento tem por objetivo validar os resultados simulados pela comparação entre os resultados reais e simulados obtidos. Assim, o experimento foi realizado em duas etapas: uma em ambiente simulado e outra em plataformas de sensores reais. A etapa simulada foi realizada com o simulador Avrora, como as anteriores, e a etapa real foi realizada com dispositivos MicaZ reais em ambiente controlado (no laboratório de Redes e Sistemas Distribuídos do iNCE/UFRJ).

Neste experimento as seguintes métricas são utilizadas para fins de comparação: atraso do processo de decisão, consumo de energia e eficiência do CONDE. O **atraso**

do processo de decisão consiste do tempo gasto pelo CONDE desde o momento em que o sensoriamento é realizado até o momento em que uma decisão é executada no edifício inteligente. O **consumo de energia** diz respeito à quantidade de energia gasta pelos nós sensores ao executar as aplicações em conjunto com o CONDE. Embora um perfil de consumo de energia já tenha sido traçado na seção 4.3.2, tal consumo é uma métrica importante no que diz respeito à comparação entre a versão simulada e a real deste experimento. A avaliação do consumo de energia, no entanto, não será feita como no experimento anterior, pois os nós reais não possuem uma API que permita obter a quantidade de energia exata gasta pelo sensor. Então, a fim de poder comparar os resultados das duas etapas dos experimentos, foi feita uma aproximação da energia gasta a partir do número de mensagens transmitidas e recebidas (já que é sabido que, para a maior parte das aplicações de sensoriamento, a maior fonte de consumo de energia é com comunicação). A **eficiência** do CONDE foi obtida através da análise das decisões tomadas pelo sistema, com o objetivo de calcular, com base nos dados de entrada, quantas decisões são consideradas *certas* e quantas são consideradas *erradas*. Usou-se como métrica de eficiência um percentual dado pela razão entre o número de decisões corretas e todas as decisões no período de simulação.

A medição aproximada do consumo de energia que foi utilizada para avaliar este experimento foi baseada nos dados descritos a seguir e obtidos em [Krämer e Geraldly 2006]. A taxa de transmissão da interface de rede sem fio do dispositivo MicaZ é 4 $\mu\text{s/bit}$, a corrente elétrica no circuito para receber dados é 18,8 mA e para enviar dados é 17,4 mA e a voltagem base utilizada no dispositivo MicaZ é 3V. Assim, obtemos:

$$\text{QRX} = 3\text{V} * 18,8 \text{ mA} * 4 \mu\text{s/bit} = 0,2088 \mu\text{VAs/bit} = 0,2256 \mu\text{J/bit} \quad (1)$$

$$\text{QTX} = 3\text{V} * 17,4 \text{ mA} * 4 \mu\text{s/bit} = 0,2088 \mu\text{VAs/bit} = 0,2088 \mu\text{J/bit} \quad (2)$$

Com base nas informações das Equações 1 e 2, foram adicionadas ao programa original instruções com o objetivo de contar o número de mensagens recebidas e transmitidas e, ao final do tempo do experimento, instruções para enviar esta contagem ao NEB para coleta. Conforme observado na Tabela 3 (onde DP é o desvio padrão e IC é o intervalo de confiança), a etapa real do experimento consumiu menos energia que a etapa simulada, em média 34,148 J e 34,835 J, respectivamente. Isto se deu como consequência de uma pequena diminuição na quantidade de pacotes recebidos. Esta diminuição foi atribuída a interferência da RASSF no ambiente real, a qual não foi prevista na simulação de ruídos na versão simulada do experimento.

Tabela 3. Comparação entre os experimentos simulado e real

Experimentos	Simulado			Real		
	Média	Desvio Padrão	IC	Média	Desvio Padrão	IC
Atraso (ms)	33,142 ms	0,942	$\pm 0,377$	33,057ms	0,925	$\pm 0,37$
Consumo de energia (J)	34,835 J	1,206	$\pm 1,057$	34,148 J	1,258	$\pm 1,103$
Eficiência do CONDE	95,556%	3,748	$\pm 1,341$	94,333%	4,026	$\pm 1,441$

4.3.4. Comparação entre o Sistema de Decisão Centralizado e Distribuído

Neste experimento foram comparados o CONDE e uma abordagem centralizada (na qual não são utilizados atuadores, ou seja, trata-se de uma RSSF) apresentada em [Tsai et al 2008]. Tal comparação permite analisar principalmente as vantagens de uma abordagem descentralizada e de fazer uso de processamento dentro da rede. Tais

vantagens serão avaliadas em termos do consumo de energia (tanto da RASSF quanto do edifício) e da eficiência das duas abordagens, quanto a quantidade de decisões corretas. Na abordagem centralizada, os sensores enviam os dados coletados para a estação base e esta envia os dados para fora da rede, determina a ação a ser tomada e depois envia a resposta aos atuadores, ou seja, não há nós decisores no sistema.

O cenário usado em [Tsai et al 2008] consiste de uma casa com 2 ambientes, um monitorado pelo sistema de decisão e outro utilizando equipamentos de refrigeração tradicionais (não dotados de capacidades “inteligentes”). O sistema proposto em [Tsai et al 2008] é um sistema de controle de temperatura baseado em *smart-skins*. *Smart-skins* são elementos auto-reguláveis da interface externa do ambiente, que permitem avaliar o ambiente externo ao edifício inteligente e se adaptar a mudanças de temperatura. Os *smart-skins* incluem RSSF para fazer o monitoramento do ambiente. Diferentemente de nossa abordagem, a decisão de mudança de estados nos *smart-skins* não é realizada internamente a própria rede. No cenário proposto, as salas foram monitoradas de 10 em 10 minutos durante 3 horas. Resultados são apresentados na Tabela 4. Pode-se observar que o uso de um sistema de decisão descentralizado é vantajoso em termos de eficiência e consumo de energia. Em relação às decisões tomadas, o CONDE apresentou-se 33,222% mais eficiente em relação ao sistema proposto em [Tsai et al 2008]. Em relação ao consumo de energia no edifício inteligente, apresentou uma economia de 8,529% em comparação a [Tsai et al 2008]. Por ser descentralizado, o tempo de resposta dos nós decisores do CONDE é muito menor que em um sistema de decisão centralizado, pois a decisão é transmitida em apenas um salto, enquanto no outro os dados coletados e a decisão tomada percorrem vários saltos saindo e entrando na RSSF.

Tabela 4. Comparação entre os experimentos simulado e real

Experimentos	CONDE			[Tsai et al 2008]
	Média	DP	IC	Média
Eficiência do sistema	94,333%	4,026	±1,441	61,111%
Total de energia economizada no edifício	63,529%	4,652	±2,753	55%

5. Conclusões

Neste trabalho foi proposto um sistema de decisão descentralizado e colaborativo para aplicações de RASSF para edifícios inteligentes. O objetivo deste sistema de decisão é contribuir para a sustentabilidade ambiental através da melhoria da eficiência energética e, conseqüentemente, a redução da emissão de gases poluentes pelos edifícios. Este sistema foi implementado para ser associado a aplicações da terceira geração dos edifícios inteligente e para ser implantado em RASSF, de forma a descentralizar o processo de decisão das aplicações.

Como trabalhos futuros serão investigados (i) métodos de agregação de dados para edifícios inteligentes, (ii) uso dos conjuntos nebulosos a fim de reduzir o número de regras armazenadas na memória e para tornar o processo de decisão mais sensível a pequenas variações no sensoriamento, (iii) métodos de colaboração entre os NSD's, bem como o impacto da aplicação destes novos métodos sobre o consumo de recursos computacionais e de energia dos sensores. A descentralização do sistema de decisão como mecanismo para trazer maior robustez ao sistema será adicionalmente avaliada. Espera-se obter benefícios nesse sentido, pois a falha de componentes não comprometeria o funcionamento global do sistema.

7. Referências

- Agarwal, Y., Balaji, B., Gupta, R., Lyles, J., Wei, M. and Weng, T. (2010) Occupancy-driven energy management for smart building automation. In BuildSys '10: Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building, p. 1–6.
- Alberola, R. P., Pesch, D. (2008) AvroraZ: extending Avrora with an IEEE 802.15.4 compliant radio chip model, In Procs. of the 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks, p. 45–50.
- Erickson, V. L., Lin, Y., Kamthe, A., Brahme, R., Surana, A., Cerpa, A. E., Sohn, M. D. and Narayanan, S. (2009) Energy Efficient Building Environment Control Strategies Using Real-Time Occupancy Measurements. In BuildSys '09: Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, p. 19–24.
- Filippini, L., Vitaletti, A., Landi, G., Memeo, V., Laura, G. and Pucci, P. (2010) Smart City: An Event Driven Architecture for Monitoring Public Spaces with Heterogeneous Sensors. In International Conference on Sensor Technologies and Applications, p. 281–286.
- Krämer, M., Gerdaldy, A. (2006) Energy Measurements for MicaZ Node. Technical report, Universität Stuttgart. In 5.GI/ITG KuVS.Fachgespräch "DahtloseSornetze", p. 61–68.
- Liu, M., Mihaylov, S. R., Bao, Z., Jacob, M., Ives, Z. G., Loo, B. T. and Guha, S. (2010) SmartCIS: Integrating Digital and Physical Environments. ACM SIGMOD Record Journal, v. 39, i. 1, p. 48–53.
- Mohamaddoust, R., Haghghat, A. T., Kafash, M. and Sharif, M. J. M. (2010) Designing the Lighting Control System Based on WSN with Optimization of Decision Making Algorithm. In CICN 2010: International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, p. 279–283.
- Schor, L., Sommer, P. and Wattenhofer, R. (2009) Towards a Zero-Configuration Wireless Sensor Network Architecture for Smart Buildings. In BuildSys '09: Proceedings of the First ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, p. 31–36.
- Shu, F., Halgamuge, M.N. & Chen, W. (2009) Building Automation Systems Using Wireless Sensor Networks: Radio Characteristics and Energy Efficient Communication Protocols. Electronic Journal of Structural Engineering – Special Issue: Sensor Network on Building Monitoring: from Theory to Real Application, p. 66–73.
- Tsai, K.C., Ming-Whei F., Wen S., Lai H. (2008) Wireless Sensor Networks and Sensor Fusion Technology for Ubiquitous Smart Living Space Applications. In International Symposium on Universal Communication, p. 295–302.
- Yeh, L. W., Lu, C. Y., Kou, C. W., Tseng, Y. C. and Yi, C. W. (2010) Autonomous Light Control by Wireless Sensor and Actuator Networks. IEEE Sensor Journal, v. 10, i. 6, p. 1029–1041.