

Uma Plataforma Auto Adaptativa de Internet das Coisas Voltada Para Ambientes Heterogêneos

Renato J. L. Mota¹, Helder M. N. S. Oliveira¹

¹Faculdade de Computação – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Belém – PA – Brasil

renato.mota@icen.ufpa.br, heldermay@ufpa.br

Abstract. *Due to the explosive growth in the Internet of Things (IoT) area over the last years, it is common to find problems in the literature involving a big number of devices disposed in a small area, these are classified as Dense IoT (DIoT). Some of those involve network congestion, high energy consumption and inefficient use of resources. Moreover, a new concern is emerging, information relevancy. The increasing data volume in DIoT traffic makes it more important than ever to identify relevant data and prioritize it. Having this in mind, this paper proposes an adaptative IoT platform that makes use of intelligent mechanisms to observe some core indicators, such as traffic loss, harvested energy rate and number of nodes observing an event. Because of this, instructions are defined in order to adjust the network. These come as the following parameters: message confirmability, notification interval and even the elimination of a node from observation. In this sense, a much more reliable, dynamic and intelligent network is created.*

Resumo. *Tendo em vista o explosivo crescimento da Internet das Coisas (IoT) nos últimos anos, é possível encontrar diversas problemáticas envolvendo o grande número de dispositivos em uma área pequena, categorizados como Dense IoT (DIoT). Estes são: congestão da rede, alto consumo energético, uso ineficiente de recursos, entre outros. Além disso, uma nova preocupação surge, a relevância de informação. Devido ao grande volume de dados em DIoT, é cada vez mais necessário definir quais dados são realmente relevantes e priorizá-los. Em função disso, esse trabalho de conclusão de curso propõe uma plataforma auto adaptativa IoT, que utiliza mecanismos inteligentes para monitorar alguns indicadores, como o número de dispositivos observando um evento, a taxa de perda de mensagens da rede e a quantidade de dispositivos com energy harvesting (coleta de energia do meio ambiente). A partir disso, é possível ajustar a própria rede, através de instruções contendo parâmetros como a taxa de confirmabilidade das mensagens, intervalo de notificação e até mesmo a eliminação de um dispositivo da observação do evento atual. Dessa forma, cria-se uma rede DIoT dinâmica e maleável, que pode adaptar-se a diversos contextos diferentes.*

1. Introdução

Recentemente, houve uma explosão tecnológica no ramo da Internet das Coisas (IoT), revolucionando dramaticamente a sociedade através de novas tecnologias

e aplicações e, especialmente, plataformas [M. Zhang et al. 2020]. Corroborando isso, estima-se que o número de dispositivos IoT conectados alcance 6 bilhões até 2026 [Ericsson 2020]. Ademais, é necessário considerar o espaço físico onde estes dispositivos se encontram. Devido à tendência urbana de áreas densas e superpopulosas, a disposição destes dispositivos está propensa a seguir a mesma distribuição. Essa configuração espacial, especialmente em cidades contendo um grande número de dispositivos IoT por metro quadrado, leva ao que se chama de Internet Densa das Coisas (DIIoT).

DIIoT não se resume ao número de dispositivos, mas considera também a heterogeneidade dos mesmos. É notável que com o cenário urbano discutido, diferentes marcas e fabricantes estão criando os mais diversos produtos. Dentre as diversas características de um dispositivo IoT, a fonte de energia a ser utilizada por eles, atrai grande interesse da comunidade acadêmica. O interesse é ainda maior quando se trata de fontes renováveis [Diyan et al. 2020]. A integração de energias renováveis, quando feita corretamente, pode ser benéfica não só para o dispositivo, mas para a rede como um todo. Isso se deve a possibilidade de impor uma carga maior de trabalho aos dispositivos com fontes de energia renováveis, permitindo que os nós tradicionais usem menos de suas fontes escassas de energia. Em suma, alguns nós da rede executam tarefas que demandam mais energia que outras e a rede deve balancear essa disparidade de acordo com a capacidade energética de cada dispositivo.

Como exemplo prático de uma rede DIIoT, Dao *et al.* utiliza uma aplicação composta por mais de 10.000 dispositivos IoT para monitorar áreas de fábricas e prédios inteligentes [Dao et al. 2018]. O trabalho considera a utilização de gigabytes de dados por segundo. É necessário ter em vista que uma rede DIIoT pode facilmente atingir níveis altíssimos de perda de mensagens, congestão da rede e gasto energético. Estes problemas podem ser evitados através do controle da produção de dados e da adaptação dinâmica dos níveis de confiabilidade da rede [Akpakwu et al. 2019]. Neste sentido, é necessário gerenciar o volume de tráfego injetado na rede considerando o impacto na vida útil ou outros indicadores de qualidade, como o nível de congestão da rede e o índice de perda de mensagens. Os dispositivos IoT podem coletar dados com diferentes níveis de relevância, ou relevância de informação (RI), onde a RI é baseada no dado coletado [Costa et al. 2020]. O objetivo de realizar essa classificação é o uso mais eficiente dos recursos de rede. Dessa forma, dados críticos podem ser protegidos contra a perda, através de um maior gasto energético. Enquanto dados pouco relevantes são enviados com mínimo esforço, investindo poucos recursos na proteção contra perda e atraso. Isso é conhecido como IoT Centrado na Informação [Zhang et al. 2020].

O gerenciamento da comunicação em grupo não pode ser dependente de intervenção humana, devido a natureza dinâmica de ambientes DIIoT. Destarte, auto adaptabilidade rápida e autônoma permitindo que a rede se ajuste a diversas situações é extremamente desejável para redes DIIoT. Auto adaptabilidade significa ajustar as configurações de comunicação, reagindo a eventos quase que em tempo real através de indicadores como perda de mensagens, congestão, excesso de tráfego ou desbalanceamento de consumo energético. A ideia principal é constantemente controlar alguns parâmetros chave na comunicação, como o número de dispositivos ob-

servando um determinado evento, o intervalo de tempo entre notificações sobre o mesmo evento, além da taxa de mensagens confirmáveis, a fim de evitar esses recorrentes problemas em ambientes DIIoT.

A fim de atingir comunicações auto adaptáveis, neste trabalho, recorreu-se a técnicas de inteligência artificial, que foram dispostas no centro da plataforma proposta. Assim, dispositivos IIoT podem ser ajustados, levando em consideração todos os aspectos discutidos até então, como as fontes de energia envolvidas, níveis de congestão, RI, e volume de dados produzido. Dessa forma, mesmo que um dispositivo não tenha conhecimento de todos esses fatores, ele pode se ajustar a eles através de instruções externas. Nesse contexto, comunicações em grupo são vistas como grandes aliados às redes DIIoT [Islam et al. 2019], pois elas permitem que dispositivos ajustem o volume de tráfego, evitando mensagens redundantes [Rahman and Dijk 2014], diminuindo a complexidade de lidar com um grande número de dispositivos. O CoAP (Constrained Application Protocol) tem um importante papel em IIoT, provendo os princípios de arquitetura *REST* (Representational State Transfer). Isso permite a criação de interfaces cliente-servidor simplificadas, flexíveis e leves, especialmente para dispositivos IIoT com limitações de bateria, memória e processamento [Rahman and Dijk 2014].

Neste trabalho de conclusão de curso, é introduzido um mecanismo de comunicação em grupo energeticamente eficiente e confiável, chamado Self Adjusting Dense IIoT Networks (SADIN). Os grupos são adaptados de acordo com o número de membros do mesmo intervalo de transmissão e confiabilidade das mensagens, *i.e.*, tipo de notificações, essas sendo confirmáveis ou não-confirmáveis. O SADIN considera um controlador baseado em lógica fuzzy permitindo, de forma autônoma, detectar e reagir a mudanças de contexto, fazendo com que a comunicação em grupo se ajuste de forma dinâmica através de decisões inteligentes. Essas decisões se transformam em instruções, no formato de mudanças no intervalo de comunicação e na taxa de mensagens confirmáveis. Os indicadores do grupo são a taxa de perda de mensagens, o tipo de fonte de energia (renováveis ou não-renováveis), a taxa de coleta de energia, o número de dispositivos e o nível de RI. Foram conduzidos testes em simulação e em *testbed*. Os resultados mostram que o SADIN melhora a performance de redes DIIoT em termos de produção de dados eficiente, atraso de notificação, taxa de perda de mensagens e consumo energético, quando comparado com o protocolo padrão em IIoT.

As principais contribuições desse trabalho são: *i*) Propor e implementar um mecanismo auto-adaptativo orientado a grupos para redes DIIoT. *ii*) Promover a integração das funcionalidades propostas dentro de uma plataforma IIoT, junto com extensões do CoAP para comunicações em grupo. *iii*) Avaliação de performance baseados em simulações e testes em dispositivos reais com um protótipo da solução.

Este trabalho de conclusão de curso dispõe-se da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, onde discute-se as soluções similares mais relevantes no estado-da-arte. A Seção 3 descreve a solução proposta, nomeada "SADIN". Em seguida, a Seção 4 apresenta o método de avaliação da solução e seus resultados. Por último, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Existe uma ampla variedade de soluções verdes para IoT, porém apenas algumas que consideram indicadores de qualidade de tráfego, recursos de rede e fontes de energia heterogêneas. Slabicki *et al.* propuseram um *framework* para gerenciamento dinâmico de comunicação em DIoT em cenários urbanos, utilizando o protocolo LoRa [Slabicki et al. 2018]. Apesar do trabalho ser completo e relevante, os autores não consideram os impactos de fontes de energia heterogêneas neste caso.

Elmangoush *et al.* apresentaram um Transporte Adaptável de Máquina para Máquina (AdM2M) para fazer a seleção dos protocolos de comunicação de um determinado caso de monitoração [Elmangoush et al. 2015]. Esses autores mostraram que a comunicação adaptável em plataformas IoT podem ser orientadas a aplicação e orientadas a tráfego. AdM2M usou políticas de plataforma para identificar a origem de uma requisição para utilizar o protocolo de transporte que melhor se encaixa com as expectativas da aplicação.

Dispositivos que coletam energia precisam controlar seu uso de recursos para que não sejam sobreutilizados ou subutilizados, que causaria um *overflow* ou *depletion*, respectivamente. Mukherjee *et al.* propuseram uma solução para aumentar a eficiência de redes densas heterogêneas em um âmbito industrial [Mukherjee et al. 2019]. Isso é feito através de um esquema que utiliza uma cadeia de Markov de 3 estados, garantindo que os dispositivos coletores de energia não atinjam exaustão de energia antecipadamente. Jeong *et al.* também discutiram uma abordagem para regular o volume de tráfego em redes com coleta de energia. Nesse contexto, um dispositivo estima a sua energia remanescente antes que a comunicação periódica seja executada. Caso o dispositivo identifique um *overflow* de energia, o mesmo transmite, para evitar desperdiçar energia. Por outro lado, se a energia está prestes a se acabar, o dispositivo não transmite nenhum dado [Jeong et al. 2016].

Betzler *et al.* introduziram um mecanismo de controle de congestão em cima do CoAP, que promoveu diminuição significativa de retransmissões, quando comparado com outras soluções. Entretanto, essa abordagem apenas leva em consideração fatores internos de congestão, como tipo de mensagem. Esse trabalho não explorou níveis críticos de evento [Betzler et al. 2016]. Além de não considerar a possibilidade de fontes de energia heterogêneas, que beneficiaria a sobrevivência da rede. Jarvinen *et al.* incrementaram esse trabalho, onde foram considerados cenários mais graves de congestão [Jarvinen et al. 2018].

Jaramillo *et al.* abordaram alguns desses problemas em redes de sensores sem fio, como a perda de mensagens e atraso. Os autores focam em prover melhorias no protocolo MAC, enquanto consideram fatores críticos para a qualidade de serviço da rede, como latência e fluxo de transmissão [Jaramillo et al. 2015]. O fato que a solução proposta considerou diferentes fontes de energia é um ponto positivo, além de melhorar a técnica de *duty cycle*. Como um dos pontos negativos, a solução falha em gerenciar o tráfego da rede, devido a falta de uma visão mais geral da rede, seus recursos e dispositivos.

Correia *et al.* discutiram o problema de consumo energético, junto com a congestão de tráfego em IoT. Uma solução é proposta por eles, onde *proxies* e *caches* são

utilizados com finalidade de reduzir o consumo energético e usar a largura de banda de maneira mais eficiente. Entretanto, o trabalho não considera fontes de energia heterogêneas, nem classificações de eventos [Correia et al. 2016].

Tráfego IoT pode envolver diferentes níveis de RI na coleta de dados, onde a relevância pode ser definida baseada em diferentes fatores para cada aplicação, como a localização do dispositivo ou o valor medido [Costa et al. 2020]. A ideia de controlar a comunicação deve levar em consideração a classificação da relevância de informação, assim como o tipo de fonte energética. Com isso, confiabilidade pode ser trazida a rede, tendo em vista que a mesma tentará garantir a entrega de mensagens classificadas como importantes.

Baseado na análise do estado-da-arte, é possível observar que os trabalhos citados não foram concebidos com objetivo de prover ajustes dinâmicos para grupos densos de IoT. Os problemas abordados comumente procuram obter dados providos por um grupo de dispositivos ou focam em como realizar a comunicação em grupo utilizando o mínimo de mensagens possíveis. Entretanto, problemas importantes não são discutidos, como o excesso de mensagens redundantes. Além disso, a confiabilidade da rede é, muitas vezes, deixada de lado. Finalmente, o estado-da-arte não discute a combinação de balanço entre uso de energias renováveis e não renováveis e RI. Um sumário da revisão do estado-da-arte é apresentado na Tabela 2.

Tabela 1. Trabalhos relacionados a soluções DIoT voltadas para gerenciamento de recursos e eficiência energética

Trabalho	Heterogeneidade das fontes energéticas	Classificação dos eventos	Observações
[Costa et al. 2020]	Não	Sim	Diferentes prioridades de acordo com a relevância da informação
[Mukherjee et al. 2019]	Sim	Não	Mecanismos cíclicos que controlam períodos de inatividade para poupar energia
[Slabicki et al. 2018]	Não	Não	Utiliza LoRA
[Correia et al. 2016]	Sim	Não	Utiliza proxies e caches.
[Jeong et al. 2016]	Sim	Não	Adapta-se a fim de evitar overflow ou underflow na rede
[Betzler et al. 2016]	Sim	Não	Tratamento de congestão
[Elmangoush et al. 2015]	Não	Não	Adapta-se aos requisitos da aplicação
[Jaramillo et al. 2015]	Sim	Não	Trabalha em nível de camada física

3. SADIN

Essa Seção introduz o SADIN, uma plataforma IoT que procura gerenciar o funcionamento de redes DIoT e prover eficiência na utilização de recursos de rede. O SADIN

permitirá que a rede se torne auto adaptativa, monitorando e gerenciando o uso dos recursos da rede. Os fatores gerenciados pelo SADIN são: (1) o intervalo de notificação; (2) a natureza do intervalo de notificação (confirmável ou não-confirmável) e (3) número de observadores do evento. Este gerenciamento é feito baseado na observação de algumas características apresentadas pela rede, como o nível de relevância do evento; o tipo de fonte de energia; a porcentagem de observadores ativos e a taxa de perda de mensagens atual. A inteligência por trás das definições de instruções do SADIN são uma caixa fuzzy.

Uma visão geral do SADIN é apresentada na Figura 1. Nesta, o fluxo de informação do sistema é desenhado, reduzindo a aplicação em três módulos essenciais. Os módulos são: (1) Nós servidores, encarregados de coletar e transmitir informações sobre eventos na rede e também de seguir corretamente as instruções provenientes do módulo fuzzy; (2) Californium, responsável por registrar e gerenciar os nós da rede, além de agregar os dados recebidos dos mesmos e os transformar em entradas legíveis para a tomada de decisões. (3) Fuzzy, o cérebro da aplicação, um simples módulo que recebe dados sobre o estado da rede e retorna decisões para tornar a mesma mais eficiente.

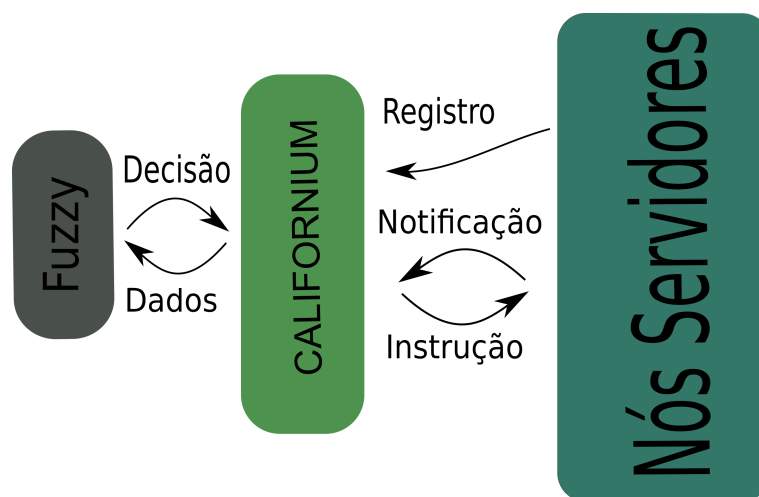


Figura 1. Visão Geral - SADIN

O SADIN considera parâmetros de monitoramento para alimentar um controlador fuzzy, com objetivo de obter decisões, como ajustes no intervalo de notificação, na natureza da notificação (confirmável ou não-confirmável) e o número de dispositivos ativamente observando o evento. A lógica fuzzy foi utilizada pois o problema enfrentado apresenta condições variantes com o tempo e o conhecimento de todos os fatores é de difícil obtenção de maneira precisa. O sistema fuzzy é um módulo essencial para realizar decisões autônomas sobre as configurações de comunicação. Foi conduzido uma análise explorativa para definir todos os grupos fuzzy e funções de pertencimento. A seguir, define-se os parâmetros de monitoramento e de ajuste e seus respectivos grupos e funções de pertencimento fuzzy.

A Figura 2 indica o cenário de atuação do SADIN. Nela, é possível denotar uma área na qual um evento foi detectado. Os nós contidos nessa área iniciam a transmissão. Alguns nós estão marcados com um "x", representando sua eliminação da

observação, ou seja, estes nós não estão realizando a transmissão de dados sobre o evento. Os nós possuem duas cores, representando seu status de coletor de energia. O fluxo de ajustes segue o padrão de um ciclo fechado representado na imagem, sempre a atualizar as informações de entrada e lendo as instruções de saída do sistema de decisões.

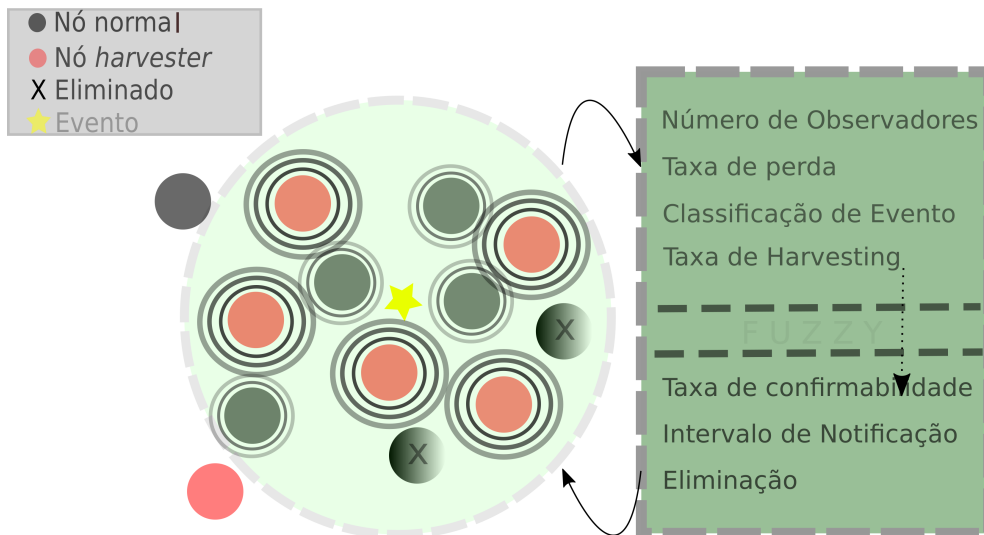


Figura 2. SADIN

As próximas Subseções estão organizadas da seguinte forma: a Subseção 3.1 discute os parâmetros de monitoramento do SADIN. A seguir, a Subseção 3.2 demonstra os parâmetros de saída, que contém os ajustes que serão implementados pela rede. A Subseção 3.3 descreve as regras de lógica fuzzy que coordenam as decisões do sistema. Por fim, a Subseção 3.4 apresenta os detalhes de implementação do SADIN.

3.1. Parâmetros de Monitoramento

O SADIN define um intervalo de tempo para indicar se um dispositivo ainda está observando um evento em particular. Portanto, o SADIN compara o último registro de observação do nó com o registro de tempo atual do sistema para atualizar a lista de dispositivos observando ativamente o evento. Além disso, o SADIN determina se um nó teve a observação interrompida ou se a mesma nunca foi iniciada. Esse número de observadores ativos influencia diretamente o fluxo e volume de dados na rede. Portanto, o SADIN usa essa informação para criar instruções de ajuste.

A representação do número de observadores é dividida em quatro grupos: baixo, médio-baixo, médio-alto e alto. Esse valor indica a taxa de dispositivos ativos observando um determinado evento. O SADIN calcula esse valor dividindo o número total de observadores ativos pelo total de dispositivos registrados. Esse parâmetro é representado como uma função de pertencimento fuzzy na Figura 3(a).

A taxa de perda de mensagens é um dos parâmetros mais importantes a influenciar as decisões do sistema, mais especificamente, a escolha entre aumentar ou diminuir a taxa de confirmabilidade das mensagens. Nesse sentido, o SADIN periodicamente computa essa taxa de perda de mensagens. A fim de obter esse valor, o

SADIN checa o MID (ID da Mensagem) de cada mensagem recebida. Assim, atualizando a taxa de perda de mensagens de cada nó, individualmente. O sistema Fuzzy classifica o valor da taxa de perda de mensagens normalizado dentre os seguintes grupos: baixo, médio e alto, como representado na 3(b).

O SADIN considera o tipo de fonte de energia que alimenta cada dispositivo IoT na rede, nesse caso, há duas categorias: fontes de energia renováveis e fontes de energia não-renováveis. Nós com *energy harvesting* têm baterias renováveis, portanto possuem uma carga de trabalho maior do que nós com baterias não-renováveis. Dessa forma, os nós com baterias não-renováveis podem economizar mais de suas baterias limitadas. A Figura 3(c) mostra a função de pertencimento referente ao percentual de nós coletores observando o evento. Esse valor é normalizado em [0, 1] através da divisão do número de nós coletores ativos o evento número total de nós ativos.

Cada dispositivo IoT observando um evento assinala um valor numérico para o nível de RI, que classifica o evento em três níveis, entre 1 e 3, indicando relevância baixa, média e alta, respectivamente. O SADIN classifica eventos globalmente por relevância através da média de todas as classificações locais, chamada de *mri*. A função de pertencimento fuzzy implementada para este classificador segue a Equação 1:

$$RI = \begin{cases} \text{baixa,} & \text{se } 0 \leq mri \leq 1 \\ \text{média,} & \text{se } 1 < mri \leq 2 \\ \text{alta,} & \text{outro caso} \end{cases} \quad (1)$$

A Figura 3(d) ilustra a função de pertencimento para relevância de eventos.

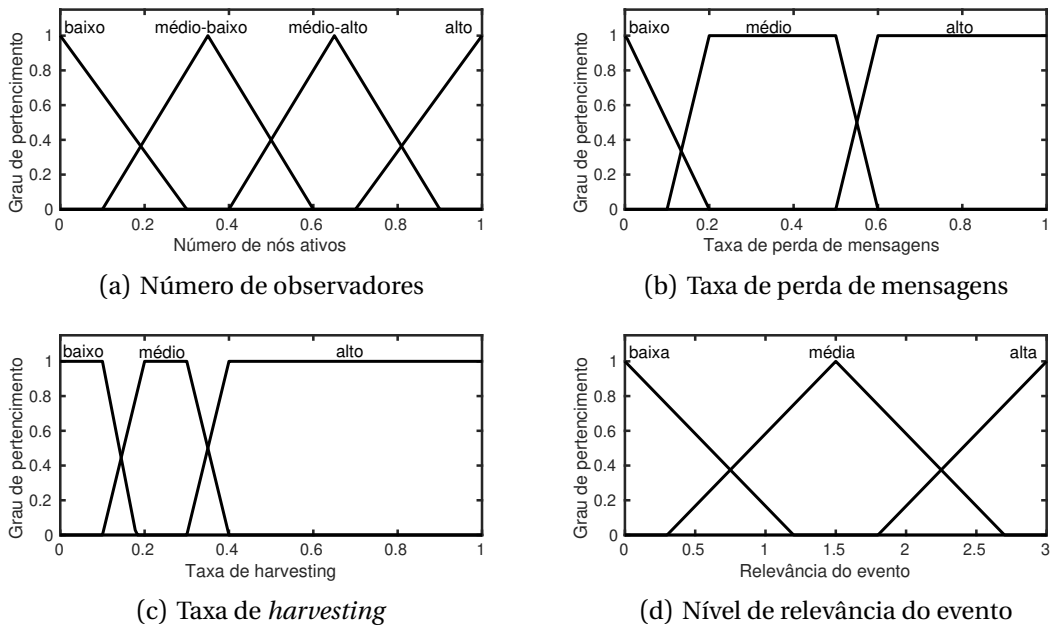


Figura 3. Funções de associação de entrada para o sistema Fuzzy

3.2. Parâmetros de Ajuste

O SADIN considera os quatro parâmetros de monitoramento descritos anteriormente para ajustar as comunicações de grupo, através dos seguintes parâmetros de ajuste: o número de dispositivos observando um evento, o intervalo de notificação e o tipo de notificações. O SADIN computa os parâmetros de ajuste baseado em decisões lógicas fuzzy. Esses ajustes derivam das funções de pertencimento fuzzy.

O SADIN adapta a taxa de confirmabilidade da rede, que é a taxa entre o número total de mensagens pelo número de mensagens confirmáveis. Nesse sentido, assume-se que um cenário de relevância baixa deveria tolerar uma taxa de perda de mensagens mais alta. Por outro lado, caso haja um evento crítico, a taxa de perda de mensagens deveria ser minimizada, ou seja, o SADIN deve aumentar a taxa de confirmabilidade da rede. A Figura 3(a) mostra a função de pertencimento para a taxa de confirmabilidade da rede. Essa função é dividida em quatro grupos: baixo, médio-baixo, médio-alto e alto. Esses vão determinar a taxa em que as mensagens confirmáveis serão emitidas dos dispositivos.

SADIN ajusta também o intervalo de notificação, que é definido como o intervalo de tempo entre duas notificações enviadas pelo dispositivo em questão. Isso tem um grande impacto no consumo energético, assim como em evitar a perda de mensagens e congestão de tráfego. Esse parâmetro foi dividido em quatro classes: curto, médio-curto, médio-longo e longo. A função de pertencimento pode ser observada na Figura 3(b).

Finalmente, o SADIN determina se um nó deveria ser eliminado da observação. Essa decisão leva em consideração o balanço entre economizar energia e produzir um maior volume de informações.

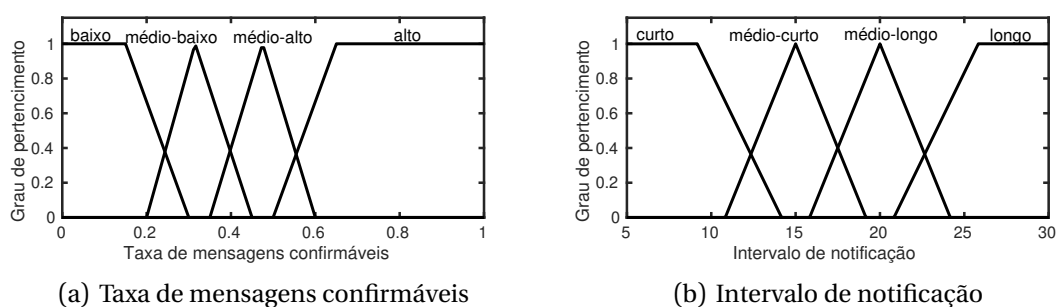


Figura 4. Funções de associação de saída para o sistema Fuzzy

3.3. Regras Fuzzy

Após a definição das funções de pertencimento, pode-se definir o grupo de regras fuzzy, que estão representados na Tabela 2. A eliminação de um dispositivo é um bom exemplo, especificamente, quando o número de observadores é alto e a maioria deles é alimentado por baterias não-renováveis, como visto na regra (R14). O SADIN decide eliminar o dispositivo observador. Essa decisão é baseada na perda individual do dispositivo e da sua fonte de energia. O dispositivo removido é o dispositivo com bateria tradicional com o maior índice de perda.

Assim, foram consideradas os parâmetros de perda do dispositivo, assim como sua fonte de energia. Com isso em mente, foi decidido que o dispositivo com bateria tradicional com maior índice de perda deveria ser eliminado. Isso se dá, pois, tal dispositivo está gastando energia para transmitir mensagens que não estão sendo recebidas. Essas regras de saída foram definidas para melhorar a auto adaptabilidade das comunicações em grupo em termos de perda de mensagens, consumo energético e confiabilidade. Elas foram testadas durante a fase de exploração. As regras fuzzy foram inseridas no Controlador Lógico Fuzzy, que é parte do Sistema de Decisão Fuzzy. A inserção é realizada apenas durante a fase inicial. Após a introdução das regras, o SADIN é capaz de calcular o nível de pertencimento para cada entrada, resultando em um controle dinâmico e rápido das saídas do sistema.

Tabela 2. Regras Fuzzy

REGRA	SE	ENTÃO
R1	Número de observadores é alto e taxa de coletores é baixa	Elimine observador
R2	Número de observadores é alto e perda é alta	Intervalo é longo
R3	Número de observadores é médio-baixo e perda é média	Intervalo é médio-curto
R4	Número de observadores é médio-alto e perda é média	Intervalo é curto-médio
R5	Classificação do evento é baixa	Intervalo é longo e confirmabilidade é baixa
R6	Classificação do evento é média	Intervalo é médio-curto e confirmabilidade é média-baixa
R7	Classificação do evento é alta	Intervalo é curto e confirmabilidade é alta
R8	Número de observadores não é alto e perda é alta	confirmabilidade é alta
R9	Número de observadores não é média-baixa e perda é média	confirmabilidade é baixa-média
R10	Número de observadores não é médio-alto e perda é média	confirmabilidade é média-alta
R11	Número de observadores não é alto e taxa de coletores não é baixa	Não elimine observador e confirmabilidade é média-alta
R12	Número de observadores é média-alta e Perda é baixa	Intervalo é médio-curto
R13	Número de observadores é baixo	Não Elimine observador
R14	Número de observadores é alto e perda é alta e classificação do evento não é alta	Elimine observador

3.4. Implementação

Foram utilizadas as seguintes ferramentas para implementar o SADIN: Contiki, CoAP, Californium. Mais especificamente, Contiki é um sistema operacional para dispositivos com restrições de energia e processamento, pequenos dispositivos IoT. Este foi modificado para comportar o SADIN, para que cada dispositivo possa receber mensagens contendo instruções de alteração de comportamento. O CoAP é um protocolo de aplicação leve para IoT e possui importantes mecanismos para reduzir a redundância na rede e o consumo energético. Dessa forma, o lado do cliente registra interesse em um dado ou medição específicas produzido pelos dispositivos CoAP. Em seguida, quando ocorre um evento, os dispositivos CoAP enviam notificações para os clientes que registraram interesse.

O lado do cliente CoAP foi implementado utilizando a plataforma Californium, que é um projeto de implementação CoAP de código aberto. O Californium provê o gerenciamento de todos os dispositivos da rede, coletando informações sobre os eventos, enquanto envia mensagens de instrução para ajustar os parâmetros de comunicação da rede. O Contiki permitiu configurar cada dispositivo para ser capaz de mudar alguns parâmetros internos em tempo real. As principais funcionalidades do SADIN residem no Californium, mais especificamente, nos módulos de evento e módulos fuzzy.

O módulo de eventos era necessário, então ele foi implementado no Californium. Ele computa e armazena todos os parâmetros de monitoração relevantes sobre cada um dos dispositivos IoT, como a taxa de perda de mensagens atual, número de observadores ativos, taxa de harvesting e classificação do evento. A cada mensagem, O SADIN atualiza sua base de dados. Dessa forma, o módulo fuzzy computa novas decisões e atualiza os parâmetros de ajuste para as comunicações em grupos, considerando as mais recentes alterações de contexto de acordo com o módulo de eventos. O SADIN envia esses ajustes através de mensagens *piggybacked* para os clientes CoAP. O modelo desta mensagem é apresentado na Figura 5.

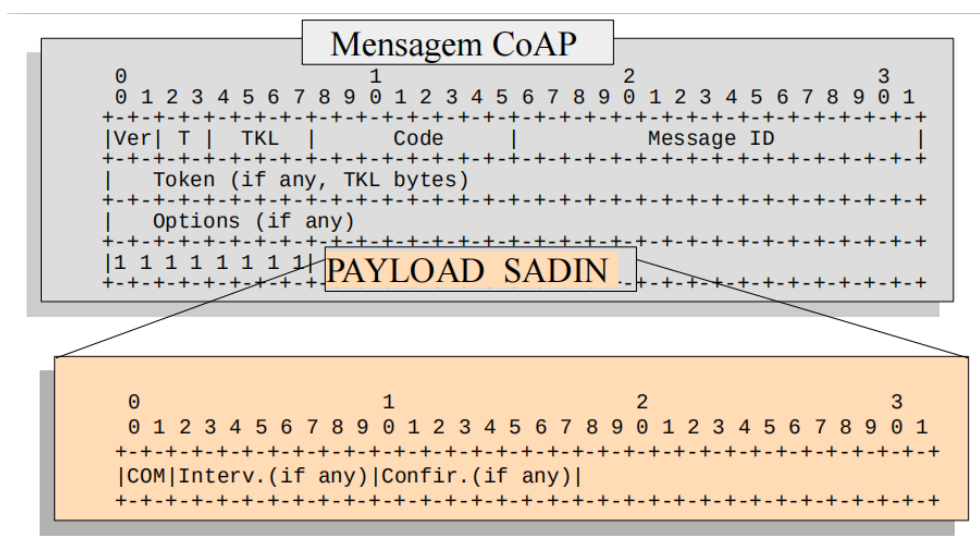


Figura 5. Mensagem CoAP

4. Avaliação

O SADIN foi executado em um ambiente de simulação, considerando a comparação entre ele e o CoAP padrão. Essas simulações resultaram em informações sobre consumo energético, perda de mensagens, intervalos de notificação e número de eliminações. O restante dessa seção é estruturado da seguinte forma: a Subseção 4.1 apresenta a descrição do cenário, a Seção 4.2 apresenta os resultados de simulação e, por fim, a Subseção 4.3 apresenta os resultados obtidos.

4.1. Cenário

O SADIN foi primeiramente implementado no simulador Cooja, que é uma ferramenta que permite a emulação de dispositivos e a simulação de redes sem fio. As configurações da simulação são apresentadas na Tabela 3. O Cooja suporta diversas arquiteturas IoT, nesse caso, foram considerados grupos de dispositivos, dispostos em uma área de $100m^2$ nas simulações. A duração da simulação foi de 30 minutos, e os testes foram repetidos 30 vezes, para prover resultados com uma boa margem de confiança. Os testes foram executados em dois níveis de densidade diferentes: 20 nós por 100 metros quadrados e 40 nós por 100 metros quadrados, que é denotado por $p=0.2$ or $p=0.4$, respectivamente.

Tabela 3. Configurações de Simulação

Parâmetro	Valor
Número de Dispositivos IoT	20 e 40
Área de Simulação	100 m ²
Duração do Evento (min)	5
Taxa de Coleta de Energia	50%
Modelo de Bateria	KiBaM
Níveis de Relevância de Evento	Alto, Médio, Baixo
Pilha de Protocolos	CoAP, 6LowPAN, RPL e ContikiMac
Mac e Física	IEEE 802.15.4
Wireless Range	10 m
Frequência de Wakeup	2Hz

Em condições similares, a solução proposta também foi implementada em dispositivos reais, utilizando a plataforma *IoT-Lab*. Esse que consiste em várias instalações espalhadas pela França, onde ambientes de teste em dispositivos IoT são disponibilizados à comunidade científica. Lá, utilizou-se dispositivos com arquitetura *M3* e um roteador de borda RPL. Uma versão modificada do Contiki OS foi instalada nos dispositivos e uma versão da solução foi executada na rede local. Os testes duraram uma hora e envolveram 20 dispositivos. Essas informações são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Configurações de Testbed

Parâmetro	Valor
Número de Dispositivos IoT	20
Área de Simulação	69 m ³
Duração do Evento (min)	5
Taxa de Coleta de Energia	50%
Modelo de Bateria	VAR-SOM-AM35
Níveis de Relevância de Evento	Alto, Médio, Baixo
Pilha de Protocolos	CoAP, 6LowPAN, RPL e ContikiMac
Mac e Física	IEEE 802.15.4
Wireless Range	10 m
Frequência de Wakeup	2Hz

A ocorrência de eventos segue uma distribuição de Poisson com $\lambda = 9$, onde cada evento tem uma duração fixa de 5 minutos. O SADIN foi testado em três cenários diferentes, onde foram considerados apenas um dos níveis de relevância. Isso foi feito pois, dessa forma, pode-se isolar a capacidade da rede de disseminar dados em dada situação.

A avaliação leva em consideração medições internas de energia, coletados pela Universidade de Columbia, que considera um pequeno painel solar, de 100cm²

e eficiência de 20%. Neste cenário de simulação, 50% dos dispositivos usados executavam coleta de energia, através do painel solar. Um módulo de bateria cinética (KiBam) foi integrado ao Contiki OS, para considerar os padrões não-lineares das baterias [Riker et al. 2017]. A ferramenta, chamada Powertrace, provém os dados de consumo energético. Assim, foi possível medir os níveis de consumo energético com uma acurácia satisfatória, nos seguintes estados: Transmissão, Receptação, Ocioso, CPU Ativa e CPU de Baixo Consumo.

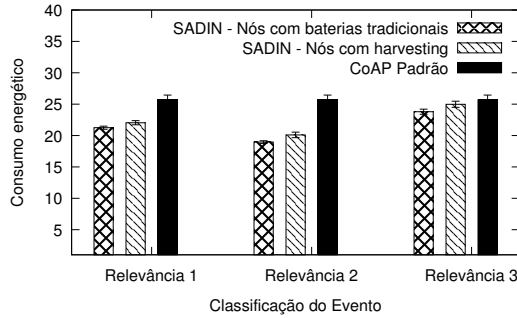
4.2. Resultados de Simulação

A Figura 6(a) e a Figura 6(b) mostram o consumo médio de energia, por cada nó em diferentes níveis de relevância de evento, para densidades de $p=0.2$ e $p=0.4$, respectivamente. Esses resultados mostram que o SADIN reduz o consumo energético em ambas densidades de rede. Quanto aos eventos de baixa relevância, os dispositivos coordenados pelo SADIN consumiram uma média de 17% menos energia que os dispositivos com CoAP padrão. Quando os eventos se tornaram mais críticos, o SADIN fez uso mais intenso dos recursos de rede, a fim de transmitir mais informações aos clientes, causando a subida do consumo energético. Isso pode ser exemplificado pela regra R7, que indica que, caso o evento seja crítico, a confirmabilidade de mensagens é alta e o intervalo de notificação é curto. Apesar disso, mesmo no caso de alta relevância de evento, o SADIN ainda consome menos energia que o CoAP padrão. Um dos fatores que contribuíram para a redução do consumo energético foi o ajuste introduzido para regular o intervalo de notificação, assim como o controle dinâmico de mensagens confirmáveis.

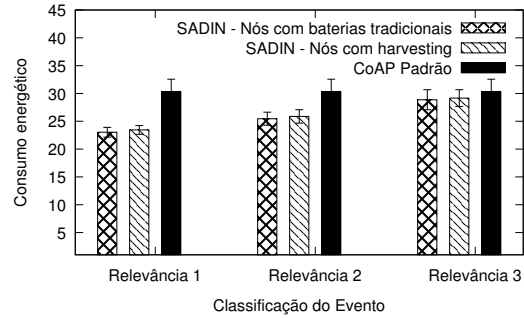
A taxa de perda de mensagens é representada na Figura 6(c). Existe uma diferença notável entre a perda entre os dois cenários avaliados, por conta do impacto que a densidade da rede trás na mesma. Em ambas as situações, quando o evento se torna mais crítico, o SADIN ajusta o comportamento da rede. Esses ajustes no comportamento, se dão em forma de eliminações de observadores, modificações na taxa de confirmabilidade e ajuste do intervalo de notificação. Uma regra fuzzy que representa isso é a R14, que verifica se o número de observadores é alto, o índice de perda é alto e o evento é de baixa relevância - isso implica numa eliminação de observador, que ajudará a descongestionar a rede e economizar recursos. Os resultados, como esperado, mostraram que a taxa de perda de mensagens se manteve, ou diminuiu de acordo com o nível crítico do evento. Sendo assim, o SADIN teve um impacto positivo no gerenciamento de grupos em redes densas IoT.

A Figura 6(d) representa a média do intervalo de notificação entre mensagens consecutivas para diferentes níveis de relevância de evento. É possível ver uma diferença significativa entre o intervalo de notificação entre os espectros de classificação de eventos. Quando um evento tem relevância baixa, cada dispositivo transmite em média a cada 20 segundos, comparado com 9,5 segundos em classificações críticas. Isso segue a definição de regras como a R2, que indica que o intervalo de notificação deve ser longo caso o número de observadores seja alto e a taxa de perda de mensagens for alta. Isso foi um resultado positivo, pois mais mensagens foram entregues pelo SADIN quando o evento foi considerado crítico, com menos atraso. O CoAP padrão não oferece adaptabilidade em termos de intervalo de comunicação, o que significa que, durante todo o tempo de operação, todas as mensagens são comunicadas

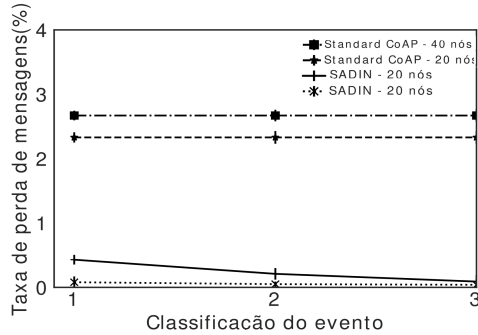
no mesmo intervalo, independentemente do nível de relevância do evento.



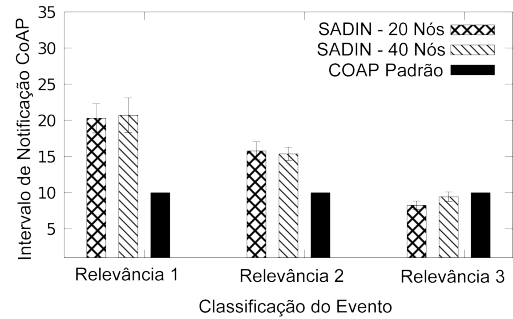
(a) Consumo médio de energia (Densidade: $p=0.2$)



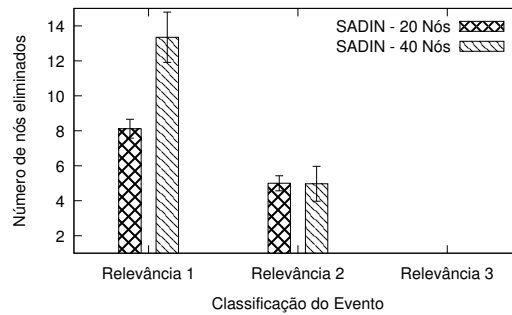
(b) Consumo médio de energia (Densidade: $p=0.4$)



(c) Taxa de perda de mensagens da rede



(d) Intervalo de notificação



(e) Eliminações de Observadores

Figura 6. Resultados da Simulação

A eliminação de dispositivos de grupos tem como objetivo economizar a energia limitada dos dispositivos sem *energy harvesting*. Quando detectado que um evento é pouco relevante e existem muitos dispositivos observando o mesmo, o SADIN escolhe por desativar os dispositivos com fontes de energia mais escassas, dessa forma, eles usariam sua energia em eventos mais importantes. Durante as simulações, quando um evento é considerado como não relevante, cerca de 13 e 8 dispositivos foram eliminados, considerando $p=0.4$ e 0.2 , respectivamente. Quando eventos foram considerados críticos, nenhum dispositivo foi eliminado pelo SADIN, pois, se um evento é crítico, deseja-se o máximo de informações sobre ele. O gráfico da Figura 7(a) apresenta essas informações. Esse resultado se dá devido à intervenção fuzzy, que utilizando regras como a R13 e R14 decidem se é válido eliminar um dispositivo.

4.3. Resultados de *testbed*

Testes foram realizados em dispositivos reais (*testbed*), utilizando a plataforma IoT-LAB, que permite a utilização de seus dispositivos através de controle remoto. Nesta plataforma, uma versão modificada do Contiki foi carregada em seus dispositivos e o SADIN foi executado em sincronia com os experimentos. Nestes testes, foi utilizado um modelo de perda chamado Gilbert-Elliott, que consiste em uma máquina de estados, estão são: estado bom e estado ruim. Quando o estado é bom, a mensagem é enviada normalmente. Se o estado é ruim, a mensagem é descartada. A troca de estados ocorre com base nas seguintes probabilidades. A probabilidade de trocar do estado ruim para o bom é 25% e a probabilidade de ir do estado bom para o estado ruim é de 15%. Foram utilizados 20 nós, de arquitetura m3. Os experimentos tiveram duração de 30 minutos e foram repetidos 10 vezes para cada nível de classificação do evento. Nas próximas Figuras podem-se observar os resultados.

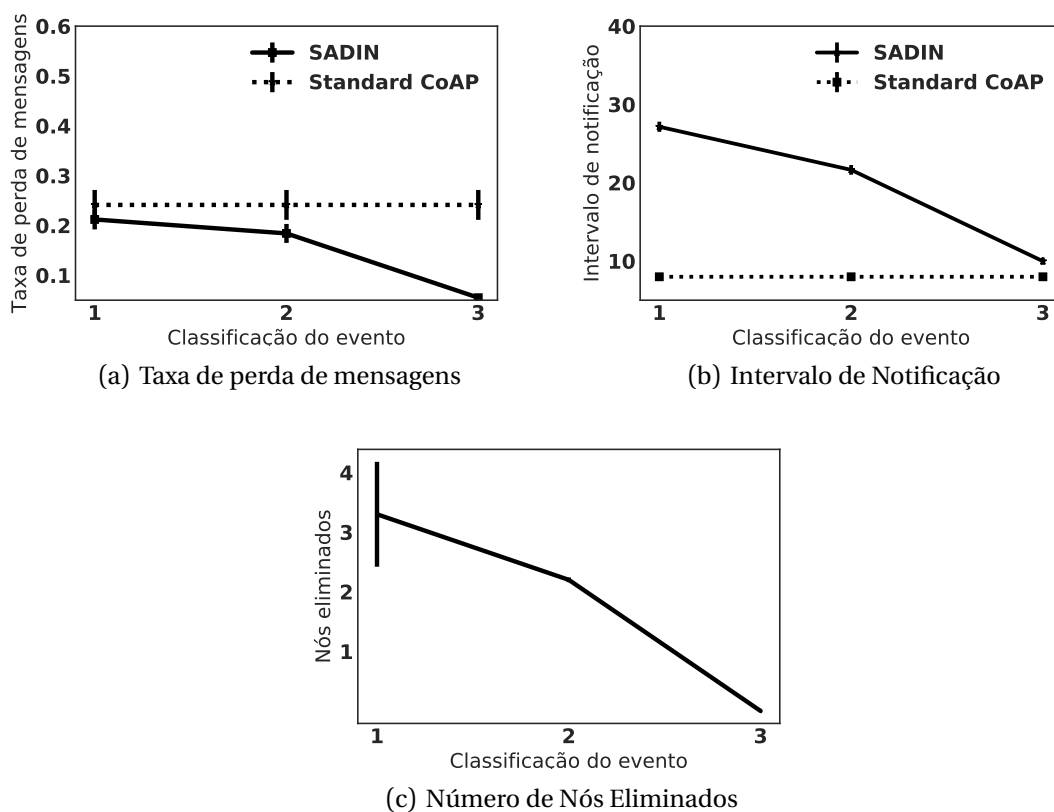


Figura 7. Resultados de Experimentos

A Figura 7 apresenta a taxa de perda de mensagens, o intervalo médio de notificação de mensagens e número de nós eliminados para diferentes níveis de relevância do evento para os protocolos CoAP e SADIN. Ao analisar os resultados é possível observar que o SADIN consegue tornar uma rede IoT muito mais confiável e eficiente, confirmando os resultados de simulação. Em todos os níveis, a perda de mensagens foi diminuída e, devido a adaptabilidade do intervalo de notificação, a redundância de dados foi, também, reduzida.

5. Conclusão

DIoT serão inevitáveis no futuro, tais como cidades inteligentes e redes de sensores. Nesse caso, DIoT tem problemas em termos de consumo energético, perda de mensagens e redundância na transmissão de dados. As pesquisas mais recentes em DIoT estão discutindo alguns desses obstáculos. Entretanto, soluções tradicionais não provêm um controle dinâmico das configurações de comunicação, enquanto usuários recebem notificações de grupos de dispositivos IoT. Além disso, estes não consideram a heterogeneidade das fontes de energia utilizadas.

Esse trabalho propõe o SADIN, uma plataforma IoT que provê inteligência e dinamicidade para uma rede previamente estática de dispositivos IoT. O SADIN utiliza a inteligência provida por um modelo de lógica fuzzy para receber entradas que constroem o contexto da rede e do evento que está acontecendo. As saídas desse módulo Fuzzy são instruções que irão tornar a rede mais adaptada ao cenário em questão.

O SADIN tem como objetivo monitorar um grupo de parâmetros que indicam o estado atual da rede. Baseado nesses parâmetros de monitoramento, o SADIN computa decisões sobre como ajustar as configurações da comunicação em grupo desses dispositivos. As simulações mostram que o SADIN reduziu o índice de perda de mensagens quando eventos importantes aconteceram. Ademais, o SADIN diminuiu o consumo energético e eliminou dispositivos quando os eventos foram considerados não relevantes. Por conta disso, a rede se tornou capaz de se ajustar de acordo com diversas situações, tornando-se mais eficiente.

Dessa forma, é possível concluir que integrar os conceitos de RI e fontes de energia heterogêneas pode ser benéfico para a própria rede, tornando-a mais eficiente na maneira como gasta seus escassos recursos. Dessa forma, evita-se gastar recursos com eventos pouco relevantes e fazendo com que dispositivos com energia remanescente mais abundante gastem mais de sua energia, promovendo mais sobrevivência a rede.

6. Publicações

Esse trabalho gerou uma publicação em 12 de julho de 2019 na conferência Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva, sob o título *Adjusting Group Communication in Dense Internet of Things Networks with Heterogeneous Energy Sources*, [Mota et al. 2019]. Além disso, esse trabalho foi expandido, aprofundado e submetido ao International Journal of Communication Systems.

7. Agradecimentos

Agradecimentos ao apoio financeiramente do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

Akpakwu, G. A., Hancke, G. P., and Abu-Mahfouz, A. M. (2019). Cacc: Context-aware congestion control approach for lightweight coap/udp-based internet of things traffic. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, page e3822.

- Betzler, A., Gomez, C., Demirkol, I., and Paradells, J. (2016). Coap congestion control for the internet of things. *IEEE Communications Magazine*, 54(7):154–160.
- Correia, N., Sacramento, D., and Schütz, G. (2016). Dynamic aggregation and scheduling in coap/observe-based wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6):923–936.
- Costa, D. G., Vasques, F., Portugal, P., and Aguiar, A. (2020). A distributed multi-tier emergency alerting system exploiting sensors-based event detection to support smart city applications. *Sensors*, 20(1):170.
- Dao, N.-N., Vu, D.-N., Na, W., Kim, J., and Cho, S. (2018). Sgco: Stabilized green crosshaul orchestration for dense iot offloading services. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(11):2538–2548.
- Diyan, M., Nathali Silva, B., Han, J., Cao, Z., and Han, K. (2020). Intelligent internet of things gateway supporting heterogeneous energy data management and processing. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, page e3919.
- Elmangoush, A., Steinke, R., Magedanz, T., Corici, A. A., Bourreau, A., and Al-Hezmi, A. (2015). Application-derived communication protocol selection in m2m platforms for smart cities. In *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, pages 76–82. IEEE.
- Ericsson (2020). The connected future.
- Islam, H. M. A., Lagutin, D., Ylä-Jääski, A., Fotiou, N., and Gurtov, A. (2019). Transparent coap services to iot endpoints through icn operator networks. *Sensors*, 19(6):1339.
- Jaramillo, R., Quintero, A., and Chamberland, S. (2015). Energy-efficient mac protocol for wireless body area networks. In *2015 International Conference and Workshop on Computing and Communication (IEMCON)*, pages 1–5.
- Jarvinen, I., Raitahila, I., Cao, Z., and Kojo, M. (2018). Fasor retransmission timeout and congestion control mechanism for coap. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–7.
- Jeong, S., Kim, H., Noh, D. K., and Yoon, I. (2016). Energy-aware data aggregation scheme for energy-harvesting wireless sensor networks. In *Computer Communication and the Internet (ICCCI), 2016 IEEE International Conference on*, pages 140–143. IEEE.
- M. Zhang, B. H., Wang, R., and Wang, Y. (2020). A pre-caching strategy based on the content relevance of smart device’s request in information-centric iot. *IEEE Access*, 8:75761–75771.
- Mota, R., Riker, A., and Rosário, D. (2019). Adjusting group communication in dense internet of things networks with heterogeneous energy sources. In *Anais do XI Simposio Brasileiro de Computacao Ubiqua e Pervasiva*, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Mukherjee, M., Shu, L., Prasad, R. V., Wang, D., and Hancke, G. P. (2019). Sleep scheduling for unbalanced energy harvesting in industrial wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 57(2):108–115.

- Rahman, A. and Dijk, E. (2014). Group Communication for the Constrained Application Protocol (CoAP). RFC 7390 (Experimental).
- Riker, A., Curado, M., and Monteiro, E. (2017). Neutral operation of the minimum energy node in energy-harvesting environments. In *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 477–482. IEEE.
- Slabicki, M., Premsankar, G., and Di Francesco, M. (2018). Adaptive configuration of lora networks for dense iot deployments. In *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pages 1–9.
- Zhang, M., Hao, B., Wang, R., and Wang, Y. (2020). A pre-caching strategy based on the content relevance of smart device’s request in information-centric iot. *IEEE Access*, 8:75761–75771.