

# Mecanismo Eficiente para Disseminação do Tráfego de Controle em Redes de Sensores Sem Fio Cluster-Tree baseadas no IEEE 802.15.4

Miguel Lino\*, Vitor Vasconcelos\*, Erico Leão\*, André Soares\*,  
Carlos Montez†, Ricardo Moraes† e Francisco Vasques‡

\* Departamento de Computação, Universidade Federal do Piauí, Brasil  
Email: {miguelneto0019,vitorvmvbr}@gmail.com; {ericoleao,andre.soares}@ufpi.edu.br

† Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil  
Email: {carlos.montez,ricardo.moraes}@ufsc.br

‡ INEGI, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal  
Email: vasques@fe.up.pt

**Resumo**—As normas IEEE 802.15.4 e ZigBee definem a pilha de protocolos amplamente utilizada na operação de Redes de Sensores sem Fio (RSSF). A topologia *cluster-tree*, suportada por estas normas, oferece recursos como escalabilidade, sendo apontada pela literatura como a mais adequada para a implementação de aplicações de RSSFs em larga escala. Entretanto, essas redes podem sofrer com congestionamentos e atrasos devido aos seus diferentes padrões de tráfego. Por um lado, são usualmente priorizadas as mensagens do tráfego de monitoramento geradas por nós sensores, que seguem em direção ao coordenador da rede (tráfego *upstream*); por outro, sofrem maiores atrasos as mensagens de controle que seguem o tráfego inverso (tráfego *downstream*). Este artigo propõe um mecanismo eficiente para a rápida disseminação do tráfego de controle em RSSFs *cluster-tree*. A ideia principal consiste em combinar um esquema de escalonamento híbrido periódico, com a definição de janelas de oportunidade *Top-Down*, com um esquema de configuração adequada dos parâmetros CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) para os nós coordenadores, a fim de possibilitar uma rápida disseminação das mensagens de controle, sem gerar impactos relevantes para o típico tráfego de monitoramento. Resultados de simulações mostram que a definição de janelas de oportunidades *Top-Down*, aliada com uma adequada configuração de valores *macMinBE* e *macMaxBE* para nós coordenadores, podem reduzir significativamente os atrasos de comunicação e aumentar a taxa de entrega de mensagens de controle, sem interferir de forma relevante nas métricas do tráfego de monitoramento, mesmo em cenários de grande densidade de nós sensores.

## I. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) são redes *ad hoc* especiais que possuem como peculiaridades dispositivos de baixa potência, baixo custo e que operam em baixas taxas de transmissão, sendo capazes de detectar, processar e enviar informações de variáveis relacionadas ao ambiente nos quais são implantadas [1]. Essas características tornam esse tipo de rede uma opção atraente para uma variedade de aplicações em larga escala, tais como: monitoramento ambiental e industrial, agricultura de precisão e sistemas veiculares [2]–[4].

O conjunto de normas IEEE 802.15.4 [5] e ZigBee [6] suportam um tipo especial de topologia de rede *peer-to-*

*peer* conhecida como *cluster-tree* (árvore de agrupamentos), que oferece recursos, tais como: baixo consumo de energia, escalabilidade e comunicação em tempo real. Tais redes são apontadas como uma das topologias mais adequadas para implementar RSSFs de larga escala [7], [8]. Além de permitir a sincronização da comunicação entre os dispositivos, a topologia *cluster-tree* implementa formações de redes complexas, onde os nós sensores são organizados em agrupamentos vizinhos (*clusters*), coordenados por um único nó chamado de coordenador de *cluster* (*Cluster-Head* – CH). Os *clusters* são interconectados através de seus CHs, formando assim uma estrutura de rede hierárquica *multicluster*.

Apesar de uma série de vantagens oferecidas pela topologia *cluster-tree*, tais como operação com eficiência energética e facilidade de implementação de mecanismos de agregação ou fusão de dados, essas redes podem sofrer graves problemas de atrasos de mensagens e congestionamentos, devido ao padrão de convergência dos tráfegos de comunicação. Tal comportamento, por um lado, prioriza a disseminação de informações geradas por nós sensores em níveis inferiores de uma topologia em árvore, que convergem (tráfego *upstream*) em direção ao nó principal coordenador da rede, chamado Coordenador PAN (*Personal Area Network*). Por outro lado, mensagens de controle seguem o caminho inverso (tráfego *downstream*), podendo sofrer assim maiores atrasos. Aplicações de larga escala frequentemente necessitam de manutenção ou atuação periódica, o que implica no envio de mensagens de controle a partir de nós coordenadores para os demais nós da rede [9].

Dentro deste contexto, este artigo propõe um mecanismo de comunicação eficiente para a rápida disseminação de mensagens de controle (tráfego *downstream*) em RSSFs *cluster-tree* baseadas nas normas IEEE 802.15.4 e ZigBee, que combina dois esquemas principais: 1) um esquema de escalonamento híbrido, que periodicamente cria janelas de oportunidade de comunicação para o tráfego de controle durante um intervalo mínimo de tempo; e 2) um esquema de configuração eficiente de parâmetros CSMA-CA para nós coordenadores, a fim de

priorizar o acesso ao meio de *cluster-heads*, resultando numa maior probabilidade de transmissões de mensagens de controle durante o período da janela de oportunidade.

O restante deste artigo está organizado como segue: Seção II apresenta as principais características de redes *cluster-tree* e o mecanismo de acesso ao meio CSMA-CA. Seção III sumariza os trabalhos mais relevantes para o mecanismo proposto neste artigo. Na Seção IV, o mecanismo proposto para rápida disseminação do tráfego de controle é apresentado, detalhando seus principais esquemas. A Seção V apresenta os resultados obtidos através de avaliação por simulação. Finalmente, Seção VI apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## II. REDES DE SENSORES SEM FIO CLUSTER-TREE

### A. As Normas IEEE 802.15.4/ZigBee

Uma rede *cluster-tree* é construída através de uma árvore de múltiplos *clusters* que podem implementar ciclos de trabalho reduzidos, permitindo uma economia de energia dos seus nós associados. Basicamente, uma rede *cluster-tree* é formada por *cluster-heads* (CHs), responsáveis por coordenar cada *cluster* e promover a sincronização entre seu grupo de nós filhos, através de quadros de sinalização (*beacons*). Os CHs podem ser conectados entre si a fim de formar uma estrutura hierárquica de múltiplos *clusters* interligados.

As redes *cluster-tree* operam no modo de comunicação com *beacons*. No modo com *beacons*, a comunicação dentro de um *cluster* é organizada com base numa estrutura chamada de *superframe*. Um *superframe* é limitado por quadros *beacons* que são periodicamente transmitidos por *cluster-heads*. Esses *beacons* sincronizam os nós de cada *cluster*, identificam o PAN e delimitam a estrutura do *superframe*. A Figura 1 ilustra a estrutura do *superframe*.

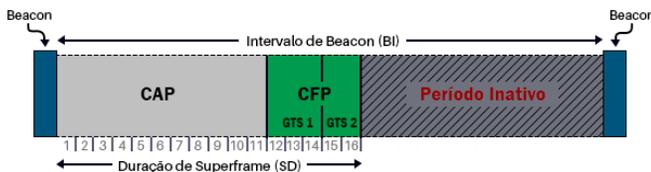


Figura 1. A estrutura do *superframe*.

Basicamente, um *superframe* é composto por duas partes: parte ativa e a parte inativa. Durante a parte inativa, nós podem entrar em modo de baixo consumo a fim de economizar energia. A parte ativa é subdividida em dois períodos: Período de Acesso com Contenção (*Contention Access Period* – CAP) e o Período Livre de Contenção (*Contention-Free Period* – CFP). Durante o CAP, os nós que desejam se comunicar, competem com outros dispositivos utilizando o mecanismo de acesso ao meio CSMA-CA. Já no CFP, nós sensores podem solicitar *slots* GTS (*Guaranteed Time Slots*) para transmissões sem contenção com baixa latência ou largura de banda garantida.

A estrutura do *superframe* é definida pelos parâmetros *macBeaconOrder* (BO) e *macSuperframeOrder* (SO). Esses parâmetros definem o Intervalo de *Beacons* (BI) e a Duração

do *Superframe* (SD), respectivamente. BI determina o intervalo no qual um nó coordenador deve transmitir periodicamente seus quadros de *beacons*. Por sua vez, SD determina o tamanho da porção ativa do *superframe*. Os valores de BI e SD são definidos através da Equação 1:

$$\begin{aligned} BI &= aBaseSD \times 2^{BO}, \\ SD &= aBaseSD \times 2^{SO}, 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \end{aligned} \quad (1)$$

onde *aBaseSD* (*aBaseSuperframeDuration*) define a duração mínima de um *superframe* (por padrão, ele corresponde a 960 símbolos, que é equivalente a 15,36 ms, assumindo uma banda de frequência de 2,4 GHz).

### B. Protocolo CSMA/CA

RSSFs *cluster-tree* baseadas nas normas IEEE 802.15.4 e ZigBee, operando no modo de comunicação com *beacons*, utilizam o algoritmo CSMA-CA (*slotted*) como mecanismo de controle de acesso ao meio. Durante o período CAP de um *cluster* (SD), os dispositivos que desejam transmitir dados devem competir entre si para terem acesso ao meio, ou seja, executam individualmente uma série de instruções que possam permitir seu acesso ao meio de forma organizada, a fim de evitar possíveis colisões.

Para programar o acesso ao meio e auxiliar nas tomadas de decisões, o protocolo CSMA-CA define três variáveis:

- *Backoff Exponent* (BE): variável utilizada no cálculo de um tempo aleatório dentro do intervalo  $[0, 2^{BE} - 1]$ , chamado de *backoff*, durante o qual o dispositivo deve esperar para checar o estado do canal (CCA – *Clear Channel Access*).
- *Contention Window* (CW): número de *backoffs* no qual o canal deve ser classificado como disponível pelo CCA, antes de se iniciar qualquer transmissão.
- *Number of Backoffs* (NB): número de tentativas falhas de acesso ao meio feitas pelo algoritmo CSMA-CA. Caso  $NB > macMaxCSMABackoffs$ , a mensagem é reportada como falha.

De acordo com [10], o comportamento do protocolo CSMA-CA é afetado por quatro parâmetros durante sua inicialização: *minimum backoff exponent* (*macMinBE*), *maximum backoff exponent* (*macMaxBE*), valor inicial de CW (*CWinit*) e *maximum backoffs number* (*macMaxCSMABackoffs*).

Dentre estes parâmetros de inicialização, o *macMinBE* e o *macMaxBE* provocam maior influência no desempenho de RSSFs [11], pois definem os valores para BE, que determinam o intervalo  $[0, 2^{BE} - 1]$  de atribuição de uma duração aleatória de períodos de *backoffs* para os quais um nó deve aguardar antes de tentar acessar o canal de comunicação sem fio.

Dessa forma, nós sensores que utilizam valores de BE mais altos podem usualmente aguardar tempos maiores para acessar o canal sem fio, o que consequentemente pode aumentar a taxa de sucesso de transmissão, por reduzir a probabilidade de dois ou mais nós transmitirem mensagens ao mesmo tempo, gerando assim colisões. Por outro lado, nós com valores de BE menores aguardam um menor tempo de contenção para acessar o canal. É importante destacar que, se vários nós em

contenção tiverem valores  $BE$  pequenos, isso poderá resultar em uma maior quantidade de nós tentando acessar o canal ao mesmo tempo, aumentando assim a probabilidade de colisões.

Neste contexto, é possível obter diferentes níveis de prioridade para nós sensores de acordo com o número de períodos de *backoffs* que um nó necessita aguardar para acessar o canal sem fio. Por exemplo, um nó que aguarda um único período de *backoff* possui maior prioridade de acesso ao canal em relação a um nó que necessita aguardar cinco períodos de *backoffs*.

### III. TRABALHOS RELACIONADOS

Vários trabalhos têm apresentados diferentes abordagens dentro do contexto de melhoria do desempenho de fluxos de mensagens para RSSFs. As propostas abordam várias questões, tais como: modelos analíticos, esquemas de escalonamento de períodos ativos e configuração de parâmetros do algoritmo CSMA-CA em redes *cluster-tree* de larga escala.

Em [12], os autores propõem o algoritmo *Superframe Duration Scheduling* (SDS), que é apresentado dentro da abordagem *Time Division Beacon Frame Scheduling* (TDBS). A ideia básica do TDBS é escalonar quadros de *beacons* durante os períodos inativos de *clusters* vizinhos, a fim de evitar colisões de *beacons* entre *clusters*. Dessa forma, os *clusters* são ordenados sequencialmente com base em suas durações de *superframes* dentro de um ciclo principal periódico. No entanto, essa abordagem não especifica nenhum mecanismo para priorizar um determinado tipo de padrão de tráfego.

Por outro lado, os trabalhos propostos em [13] e [14] fornecem abordagens para priorizar um conjunto específico de fluxos de mensagens. Em [13], os autores apresentam a abordagem *Time-Division Cluster Scheduling* (TDCS), que além de evitar colisões entre *clusters*, também atende requisitos de comunicação fim-a-fim para fluxos de mensagens limitados por tempo. A abordagem TDCS define um escalonamento viável que considera as restrições temporais e de recursos de um conjunto de tarefas.

Por sua vez, [14] apresenta a abordagem *Dynamic Cluster Scheduling* (DCS) para modificar dinamicamente o escalonamento e fornecer Qualidade de Serviço (QoS) para um conjunto de fluxos de mensagens. A ideia básica do DCS é reorganizar em tempo de execução o escalonamento de *clusters*, além de adaptar o tamanho das durações de *superframe* usando o espaço livre disponível, aumentando a largura de banda dos *clusters* envolvidos em um fluxo de mensagens específico. Embora essas abordagens priorizem fluxos específicos, elas não fornecem nenhum mecanismo para priorizar mensagens de controle para redes *cluster-tree*.

Em [9], é formulada a abordagem *Low-latency Two-way Beacon Scheduling* (LTBS) para redes ZigBee. O LTBS é uma abordagem de escalonamento de *beacons*, na qual os nós tentam obter vagas para o tráfego *upstream* e *downstream* de baixa latência, evitando interferências de outros *clusters*. No entanto, a estrutura do *superframe* original baseada na norma IEEE 802.15.4 é modificada para permitir que *cluster-heads* transmitam dois *beacons* em direções diferentes: um para *upstream* e outro para a direção *downstream*. Além disso,

embora a latência da rede seja reduzida, ela não considera nenhuma priorização de fluxo de mensagens.

Em relação ao protocolo CSMA-CA, a literatura aponta que é possível melhorar o desempenho de redes IEEE 802.15.4 ao utilizar parâmetros CSMA-CA adequados com as necessidades das aplicações da rede. Por exemplo, em [15], os autores definem classes de serviço para redes IEEE 802.15.4, onde cada tipo/classe de tráfego possui seus próprios atributos/parâmetros definidos de maneira particular. Os autores associaram diferentes valores para  $CW$ ,  $macMinBE$  e  $macMaxBE$  para filas de maior e menor prioridade.

Neste mesmo íterim, em [11] e [16], os autores propõem redes que promovem níveis diferenciados de QoS. Em [11], os autores propõem uma otimização no processo de associação dos nós sensores em redes IEEE 802.15.4. Já em [16], os autores propõem um mecanismo de ajuste dos parâmetros CSMA-CA, a fim de garantir QoS e serviços diferenciados para fluxos de mensagens gerados por dispositivos em aplicações de *smart grid*. Entretanto, nenhum desses trabalhos endereçam o problema de priorizar diferentes tipos de fluxos de mensagens em redes *cluster-tree*, principalmente mensagens de controle (tráfego *downstream*).

### IV. MECANISMO EFICIENTE PARA DISSEMINAÇÃO DE TRÁFEGO DE CONTROLE EM REDES CLUSTER-TREE

Este trabalho propõe um mecanismo de comunicação eficiente para uma rápida disseminação do tráfego de controle (tráfego *downstream*) em RSSFs *cluster-tree* baseadas nas normas IEEE 802.15.4 e ZigBee. O objetivo principal da proposta é garantir QoS para as mensagens de controle geradas pelos nós coordenadores, sem impactar de forma relevante no típico tráfego de monitoramento gerado periodicamente pelos nós sensores.

Basicamente, o mecanismo proposto considera dois esquemas principais: 1) um esquema de escalonamento híbrido periódico de *clusters* que define janelas de oportunidade *Top-Down*, a fim de favorecer a disseminação do fluxo de mensagens de controle; e 2) um esquema de configuração eficiente dos parâmetros CSMA-CA para os nós coordenadores, a fim de aumentar a probabilidade de acesso ao meio desses dispositivos, promovendo assim uma diminuição do tempo de disseminação e o aumento da taxa de sucesso de entrega de mensagens de controle ao longo da rede *cluster-tree*.

As próximas subseções descrevem o problema de disseminação do tráfego de controle e os mecanismos propostos.

#### A. Descrição do Problema

Este trabalho considera um cenário típico de monitoramento de uma RSSF, onde um conjunto de  $n$  nós sensores são implantados de forma aleatória ao longo de um ambiente de larga escala. Os nós sensores são agrupados em *clusters*, conforme a topologia *cluster-tree* baseada nas normas IEEE 802.15.4/ZigBee. Cada *cluster* é coordenado por um único *Cluster-Head* – CH (incluindo o coordenador PAN). Cada CH envia periodicamente quadros de *beacons* para sincronizar seus

nós filhos associados e gerenciar as atividades de comunicação dentro de seu *cluster*.

O conjunto de CHs da rede *cluster-tree* é caracterizado por:  $CH_i = (SD_i, BI_i), 1 \leq i \leq n_{CH}$ ; onde  $SD_i$  e  $BI_i$  correspondem à duração de *superframe* e ao intervalo de *beacons* para o *cluster-head*  $CH_i$ , respectivamente. Além disso, é assumido que todos os *cluster-heads* possuem o mesmo BI e as durações de *superframes* para os CHs são definidas considerando o esquema de alocação proposto em [17].

Após serem implantados no ambiente, nós sensores são responsáveis por detectar variáveis físicas ao longo da sua área de cobertura e enviar esses dados de monitoramento para um nó especial denominado de nó *sink*. O nó *sink* é responsável por receber informações coletadas de nós sensores e tem a função de atuar como interface com usuários finais ou como *gateway* para outras redes. Os dados de monitoramento podem ser usados para atividades de controle/atuação. Neste trabalho, é assumido que o coordenador PAN atua como nó *sink* para a rede *cluster-tree*. A Figura 2 ilustra o ambiente considerado neste trabalho.

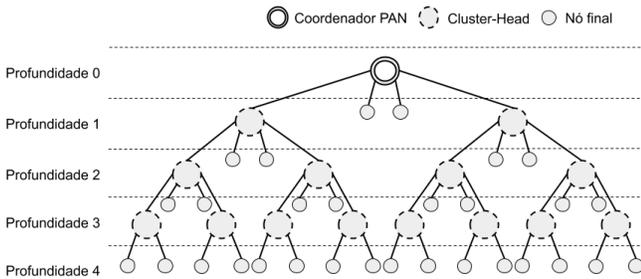


Figura 2. Estrutura de uma rede *cluster-tree*.

A fim de evitar colisões entre *clusters*, os períodos ativos dos *clusters* são previamente escalonados de acordo com um esquema de escalonamento de *beacons* por divisão de tempo [12]. Dentro desse contexto, o escalonamento de *beacons* utilizado pode priorizar (ou não) um determinado comportamento de tráfego, tornando-se assim um problema de otimização em redes *cluster-tree*. Por exemplo, o escalonamento *bottom-up* prioriza o tráfego de monitoramento (tráfego *upstream*), pois as durações de *superframe* são ordenadas a partir dos *clusters* mais profundos até alcançar o coordenador do PAN (profundidade por profundidade). Ao contrário, o escalonamento *top-down* prioriza o tráfego de controle (tráfego *downstream*), pois os SDs de cada *cluster* são ordenados a partir do coordenador PAN em direção aos *clusters* mais profundos.

Em redes *cluster-tree*, todas as comunicações são realizadas com base no roteamento em árvores hierárquicas, ou seja, mensagens irão seguir caminhos definidos pelas relações pai-filho dos nós sensores em direção ao coordenador PAN (nó *sink*). Desta forma, o uso de esquemas de escalonamento *bottom-up* é satisfatório a fim de priorizar o típico tráfego de monitoramento destas redes. Entretanto, essas redes podem enfrentar problemas típicos, tais como: atrasos de mensagens e esgotamento de *buffers*, que acarretam em congestionamento

de rede. Assim, atividades de controle periódicas são frequentemente necessárias para permitir reconfigurações de rede, o que torna o problema de priorização de mensagens de controle de extrema relevância.

### B. Esquema de Escalonamento Híbrido para Redes *Cluster-tree*

Considerando o problema descrito, este trabalho propõe um esquema de escalonamento híbrido baseado na abordagem proposta em [18], que alterna periodicamente o modelo de escalonamento de redes *cluster-tree*. Diferentemente de [18], que propõe a disseminação de poucas mensagens de controle via *broadcast*, o objetivo desse esquema é criar Janelas de oportunidade *Top-Down* (JTD) periódicas, com tamanho  $JTD_{tam}$  e periodicidade  $JTD_{periodic}$  bem definidos, a fim de permitir a disseminação otimizada de fluxos de tráfego de controle ao longo da rede através de contação. A Figura 3 ilustra o esquema de escalonamento híbrido proposto.

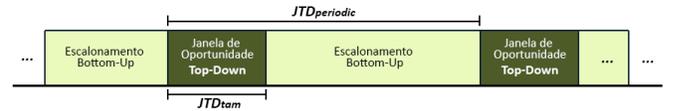


Figura 3. Esquema de escalonamento híbrido periódico, com Janelas de Oportunidade *Top-Down* para disseminação do tráfego de controle.

Inicialmente, a rede *cluster-tree* é escalonada seguindo uma abordagem de escalonamento *bottom-up*. Esse esquema de escalonamento, além de evitar colisões de quadro de *beacons* entre CHs, tende a priorizar os fluxos de mensagens de monitoramento gerados periodicamente pelos nós sensores em direção ao nó *sink* da rede (coordenador PAN). Assim, para cada CH, é definido um *offset* (intervalo de tempo) específico que corresponde ao tempo inicial para a transmissão dos seus quadros de *beacons*.

No esquema de escalonamento híbrido proposto, CHs reescalonom a rede a cada intervalo  $JTD_{periodic}$ , através da definição de *offsets* especiais ( $Escalona_{TD}$ ), alterando a abordagem de escalonamento *bottom-up* inicial para a abordagem *Top-Down*, procurando assim priorizar o tráfego de controle. Para reescalonar a rede, cada CH calcula o *offset*  $Escalona_{TD}$  através da Equação 2:

$$Escalona_{TD} = 2 \times BI - 2 \times offset[CH_i] - SD[CH_i], \quad (2)$$

onde  $BI$  é o intervalo de *beacons*, e os valores  $offset[CH_i]$  e  $SD[CH_i]$  são o *offset* inicial e a duração de *superframe* para o *cluster-head*  $CH_i$ , respectivamente.

Dessa forma, aplicando a Equação 2, uma janela de oportunidade com escalonamento *Top-Down* (JTD) é definida para os *clusters*, que tende a priorizar o tráfego de controle gerado a partir do coordenador PAN em direção a todos os CHs da rede. A duração da janela de oportunidade JTD ( $JTD_{tam}$ ) é baseada no comportamento do tráfego de controle e é definida pela Equação 3:

$$JTD_{tam} = \left\lceil m \times \frac{1}{\left\lfloor \frac{P_{controle}}{BI} \right\rfloor} \right\rceil \times BI, \quad (3)$$

onde  $m$  é o número de mensagens de controle a ser enviado a partir do coordenador PAN para todos os CHs,  $P_{controle}$  é a periodicidade das mensagens de controle,  $BI$  é o intervalo de *beacons* e  $\lfloor \frac{P_{controle}}{BI} \rfloor$  corresponde ao número máximo de mensagens de controle geradas dentro de um intervalo de *beacons*. Note que o tamanho da janela de oportunidade ( $JTD_{tam}$ ) é expressado em números de intervalos de *beacons*.

Após encerrar o período  $JTD_{tam}$  da janela de oportunidade *Top-Down*, a rede é reescalada de volta para a abordagem de escalonamento *bottom-up* inicial, voltando a priorizar o tráfego de monitoramento. Dessa forma, cada CH calcula seu *offset* inicial ( $Escalona_{BU}$ ) através da Equação 4:

$$Escalona_{BU} = 2 \times offset[CH_i] + SD[CH_i] \quad (4)$$

É importante salientar que para fazer a alteração do escalonamento da rede (Equações 2 e 4), cada CH precisa apenas de informações locais. Além disso, a periodicidade da janela de oportunidade ( $JTD_{periodic}$ ) é um parâmetro definido de acordo com as necessidades específicas de reconfiguração/atuação impostas pelas aplicações de RSSFs. O esquema de escalonamento híbrido proposto neste trabalho pode ser adequado para aplicações de larga escala que requerem manutenção periódica ou necessitam realizar sistematicamente tarefas de controle, tais como sincronização de *clock* [19] ou controle de congestionamento [20].

### C. Configuração dos Parâmetros CSMA/CA para CHs

Ao criar janelas de oportunidade *Top-Down* periódicas, mensagens de controle podem ser enviadas ao longo da rede *cluster-tree* e alcançar todos os CHs dentro de um único intervalo de *beacons*. Este trabalho assume que as mensagens de controle são propagadas ao longo dos CHs utilizando o mecanismo de comunicação indireta do padrão IEEE 802.15.4 [5], ou seja, o coordenador anuncia em seu *beacon* a existência de dados pendentes, que são solicitados e transmitidos ao CH filho durante o CAP utilizando o protocolo CSMA-CA.

Entretanto, durante a janela de oportunidade *Top-Down*, o tráfego de monitoramento ainda permanece ativo, o que implica que nós sensores continuam a enviar seus dados dentro dos períodos ativos dos seus *clusters* (utilizando o protocolo CSMA-CA). Dessa forma, apesar da janela JTD priorizar o tráfego *downstream* e permitir a propagação de mensagens de controle dentro de um intervalo de *beacons*, nós coordenadores deverão competir pelo canal sem fio para enviar as mensagens de controle ao longo da rede.

Dessa forma, este trabalho propõe um esquema de configuração eficiente dos parâmetros CSMA-CA para os nós coordenadores durante as janelas de oportunidade *Top-Down*, aumentando assim a probabilidade desses dispositivos acessarem o canal sem fio. Com isso, este esquema pretende diminuir os atrasos de disseminação de mensagens e aumentar a taxa de sucesso de entrega para o tráfego de controle em redes *cluster-tree*.

Ao iniciar a janela de oportunidade JTD, nós coordenadores utilizam uma configuração diferenciada para os parâmetros

$macMinBE$  e  $macMaxBE$  para o envio específico de mensagens de controle. Quando recebem um *beacon* com mensagens de controle pendentes, os CHs filhos solicitam as mensagens de controle pendentes alterando seus valores dos parâmetros  $macMinBE$  para 5 e  $macMaxBE$  para 8. O CH pai ao receber solicitações de dados pendentes, envia as mensagens de controle para seus CHs filhos configurando ambos seus parâmetros  $macMinBE$  e  $macMaxBE$  para o valor 1.

A definição dos valores de  $macMinBE$  e  $macMaxBE$  adotados neste trabalho para os nós coordenadores foi baseada em experimentações por simulação. É importante salientar que, a definição correta dos valores de  $macMinBE$  e  $macMaxBE$ , a fim de priorizar o acesso ao meio de nós coordenadores, depende da configuração de formação de rede utilizada (por exemplo, número máximo de CHs filhos e número máximo de nós filhos associados).

## V. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Esta Seção apresenta uma avaliação por simulação do mecanismo de disseminação do tráfego de controle proposto neste artigo. O principal objetivo é analisar o comportamento do tráfego de controle quando aplicado os esquemas propostos, comparado com abordagens da Literatura que não os utilizam. Para esta avaliação de desempenho, foi utilizado o CT-SIM [21], um conjunto de modelos de simulação que implementa as principais funcionalidades de redes *cluster-tree*. CT-SIM é baseado no *Castalia* [22], um simulador de eventos discretos *open-source* para RSSFs e redes embarcadas gerais, desenvolvido pela *National ICT Australia* (NICTA) e baseado na plataforma OMNeT++.

### A. Ambiente de Simulação

O cenário de simulação considera um ambiente com tamanho de 200 m x 200 m, variando os cenários de acordo com o número de nós sensores: 101, 151, 201 e 251 nós sensores (sendo 1 coordenador PAN). Para todos os cenários, o coordenador PAN está localizado na posição central, enquanto que os outros nós sensores foram aleatoriamente distribuídos pelo ambiente.

A rede *cluster-tree* considera o esquema SDA (*Superframe Duration Allocation*) [17] para atribuir valores de Duração de *Superframe* (SD) e Intervalo de *Beacons* (BI), onde os valores para SDs são proporcionalmente alocados para cada CH de acordo com o número de nós descendentes. Com relação ao processo de formação da rede *cluster-tree*, cada CH pode associar no máximo 6 nós filhos, o que implica que, à medida que o número de nós aumenta (diferentes cenários), a profundidade e o número de *clusters* também aumentam.

Com relação ao tráfego de monitoramento (tráfego *upstream*), cada nó sensor (excluindo o coordenador PAN) gera 1.000 mensagens de dados, a uma taxa de 1 pacote a cada 20 segundos, que são enviados em direção ao coordenador PAN (nó *sink* da rede).

Com relação ao tráfego de controle (tráfego *downstream*), o coordenador PAN gera 100 mensagens de controle, a uma taxa de 1 pacote a cada 5 segundos, enviados para todos os CHs ao

Tabela I  
CONFIGURAÇÃO DA SIMULAÇÃO.

Descrição	Valor
Área do ambiente	200 m x 200 m
Número de nós sensores	101 / 151 / 201 / 251
Mensagens de Monitoramento (por nó)	1.000 pacotes
Taxa de Mensagens de Monitoramento	1 pacote a cada 20 s
Mensagens de Controle (coordenador PAN)	100 pacotes
Taxa de Mensagens de Controle	1 pacote a cada 5 s
Modelo de Rádio	Chipcon CC2420
Número de simulações (por cenário)	20 execuções
Intervalo de Confiança dos Resultados	95%

longo da rede *cluster-tree*. É importante destacar que o tráfego de controle foi programado para ser gerado no momento da definição da janela de oportunidade *Top-Down* JTD. Para este estudo de simulação, a janela de oportunidade foi programada para iniciar após 1h do início da simulação. Por uma questão de simplificação, apenas uma janela JTD foi definida para cada cenário de simulação. Tabela I sumariza as principais configurações da simulação.

O comportamento do mecanismo de escalonamento híbrido com mudança dos parâmetros CSMA-CA proposto neste artigo é comparado com diferentes esquemas de escalonamento utilizados na literatura. Por uma questão de conveniência, os seguintes acrônimos foram utilizados na apresentação dos resultados de simulação:

- *Bottom-Up*: abordagem que utiliza um esquema de escalonamento de rede puramente *bottom-up*, mantendo assim até o final da simulação.
- *Top-Down*: abordagem que utiliza um esquema de escalonamento de rede puramente *top-down*, mantendo assim até o final da simulação.
- *Híbrido*: abordagem que utiliza um esquema de escalonamento inicial *bottom-up*, alterando para o escalonamento *top-down* durante a janela de oportunidade. Entretanto, nessa abordagem, não é utilizado o esquema de alteração dos parâmetros CSMA-CA para a transmissão de mensagens de controle. Com isso, será avaliado o impacto de alterar os valores dos parâmetros CSMA-CA para o tráfego de controle.
- *Híbrido + CSMA-CA*: mecanismo proposto neste artigo, que considera um esquema de escalonamento inicial *bottom-up*, alterando para o escalonamento *top-down*, com mudança dos parâmetros CSMA-CA, durante a janela de oportunidade.

Para cada cenário de simulação e cada abordagem de escalonamento, as seguintes métricas de desempenho foram analisadas: atrasos médios de comunicação fim-a-fim e a taxa média de entrega de mensagens. Além disso, os resultados de simulação apresentados neste artigo são as médias de 20 diferentes execuções (com diferentes conjuntos de variáveis aleatórias), considerando um intervalo de confiança de 95%.

## B. Resultados e Discussão

Primeiramente, este estudo de simulação avaliou o impacto dos mecanismos propostos neste artigo no atraso médio de

comunicação fim-a-fim das mensagens de controle, considerando os diferentes cenários de simulação. Figura 4 mostra os atrasos médios de comunicação fim-a-fim para o tráfego de controle, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

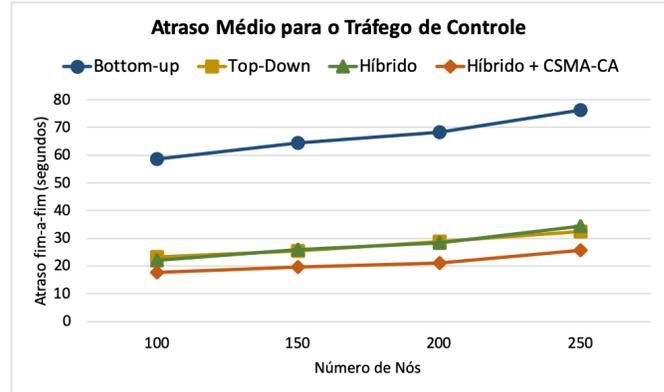


Figura 4. Atraso médio de comunicação fim-a-fim para as mensagens de controle, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

Como pode ser observado, considerando que o mecanismo *Híbrido + CSMA-CA* proposto neste artigo cria janelas de oportunidade *Top-Down* e ajusta os parâmetros CSMA-CA a fim de priorizar o tráfego de controle, os atrasos de comunicação fim-a-fim para as mensagens de controle são notavelmente menores para todos os cenários, quando comparados com as outras abordagens avaliadas. Isso se deve ao fato de que a organização dos *clusters* seguindo um modelo *top-down* tende a priorizar o tráfego *downstream*, além de que uma configuração otimizada dos parâmetros CSMA-CA aumenta a probabilidade de acesso ao canal sem fio dos nós coordenadores, favorecendo assim uma rápida disseminação do tráfego de controle.

Note também que, como as abordagens *Híbrido* e *Top-Down* utilizam um esquema de escalonamento *top-down*, os atrasos médios para as mensagens de controle também são menores. Por outro lado, a abordagem *Bottom-Up* utiliza um esquema de escalonamento que prioriza o tráfego de monitoramento (tráfego *upstream*). Dessa forma, os atrasos médios enfrentados pelas mensagens de controle são considerados altos, pois precisam atravessar vários intervalos de *beacons* através do escalonamento de rede, o que mostra que esse esquema de escalonamento não é adequado para a disseminação de mensagens de controle.

Por sua vez, Figura 5 mostra a taxa de entrega média para o tráfego de controle, considerando as diferentes abordagens. De forma similar, o mecanismo *Híbrido + CSMA-CA* entrega praticamente todas as mensagens de controle (em média, acima dos 96% de taxa de entrega), nos diferentes cenários definidos, o que mostra a importância da modificação dos parâmetros CSMA-CA para garantir que os CHs possam disseminar com eficiência as mensagens de controle. Note que as outras abordagens possuem taxas de entregas menores do que a abordagem proposta neste artigo (em média, 8% menores), devido aos problemas de entrega de pacotes gerados pelo algoritmo de acesso com contenção ao canal sem fio.

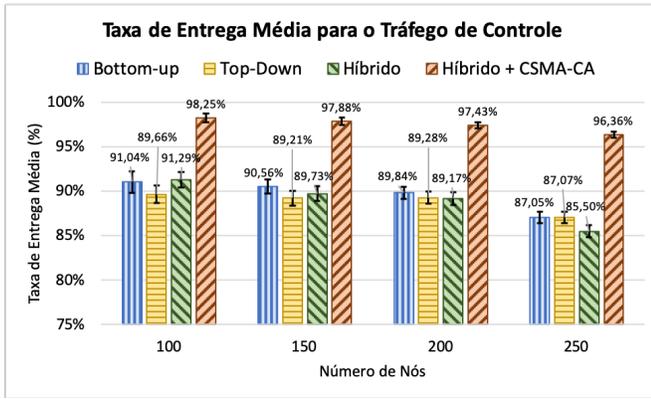


Figura 5. Taxa de entrega média para as mensagens de controle, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

Além disso, também foi avaliado o comportamento de entrega de mensagens de controle por nível de profundidade na rede *cluster-tree*. Figura 6 mostra a entrega média de mensagens de controle para os CHs em diferentes profundidades. Por uma questão de espaço, a Figura 6 apresenta apenas a entrega média para as 3 primeiras profundidades (P1, P2 e P3) da rede *cluster-tree*.

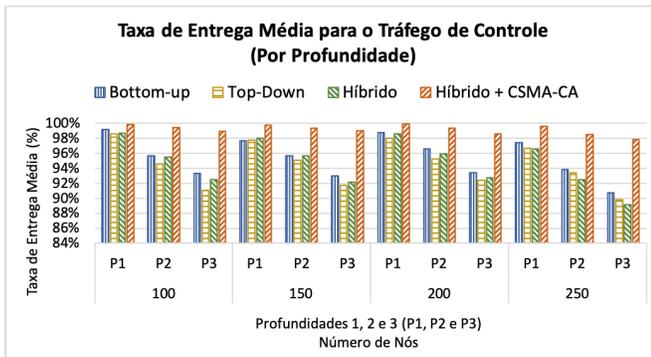


Figura 6. Taxa de entrega média das mensagens de controle por nível de profundidade, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

Como pode ser notado, à medida que a profundidade de rede vai aumentando, a taxa de entrega média das mensagens de controle das abordagens *Top-Down*, *Bottom-Up* e *Híbrido* vai diminuindo. Isso mostra que a perda de mensagens devido à contenção vai se acumulando ao longo das profundidades da rede *cluster-tree*. Por sua vez, como o mecanismo *Híbrido + CSMA-CA* procura aumentar a probabilidade de acesso ao meio dos nós coordenadores, a taxa de entrega média das mensagens de controle se mantém favorável (diminui levemente), à medida que a profundidade de rede aumenta.

Uma questão importante é também avaliar o impacto do tráfego de controle sobre o tráfego de monitoramento gerado pelos nós sensores em redes *cluster-tree*. Para este propósito, um conjunto de simulações foi realizado considerando apenas o tráfego de monitoramento, com o intuito de capturar o comportamento das mensagens de monitoramento (atrasos de comunicação e taxa de entrega) nos diferentes cenários

de simulação definidos. Figura 7 mostra os atrasos médios de comunicação fim-a-fim para o tráfego de monitoramento, considerando as diferentes abordagens e o ambiente apenas com tráfego de monitoramento.

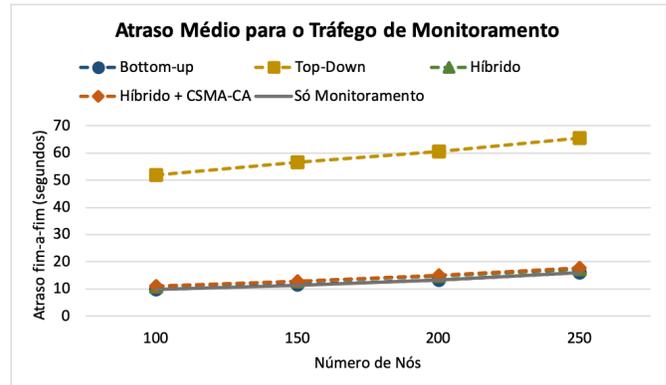


Figura 7. Atraso médio de comunicação fim-a-fim para as mensagens de monitoramento, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

Como pode ser observado, apesar de acrescentar na rede um tráfego adicional (mensagens de controle), as abordagens *Bottom-Up*, *Híbrido* e *Híbrido + CSMA-CA* impactam minimamente nos atrasos médios de comunicação fim-a-fim do tráfego de monitoramento. Especificamente para a abordagem *Híbrido + CSMA-CA*, mesmo considerando o tráfego adicional de controle e priorizando o acesso ao meio para os nós coordenadores, com a intenção de priorizar o tráfego de controle, a abordagem proposta neste artigo mantém a qualidade de serviço para o fluxo de monitoramento (em média, um aumento de 1,5 segundos no atraso médio de comunicação), considerando todos os cenários de simulação. Por sua vez, a abordagem *Top-Down* impacta fortemente sobre o tráfego de monitoramento, pois o esquema de escalonamento *top-down* não prioriza o tráfego de *upstream*, aumentando assim de forma expressiva o atraso médio de comunicação para as mensagens de monitoramento.

Por fim, Figura 8 apresenta a taxa de entrega média para o tráfego de monitoramento, considerando as diferentes abordagens e o ambiente apenas com o tráfego de monitoramento. Note que todas as abordagens avaliadas forneceram qualidade na entrega das mensagens de monitoramento, mesmo adicionando um novo fluxo de mensagens (tráfego de controle), quando comparados ao ambiente de simulação que considera apenas o tráfego de monitoramento.

Portanto, os resultados de simulação apresentados mostram que o mecanismo *Híbrido + CSMA-CA* proposto neste artigo fornece Qualidade de Serviço para ambos os tráfegos de monitoramento e controle em redes *cluster-tree*, sendo assim adequados para típicas aplicações de monitoramento que necessitam de atividades periódicas de controle/atuação.

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresenta um mecanismo eficiente para a rápida disseminação do tráfego de controle em RSSFs *cluster-tree*, sem impactar de forma relevante no típico tráfego de

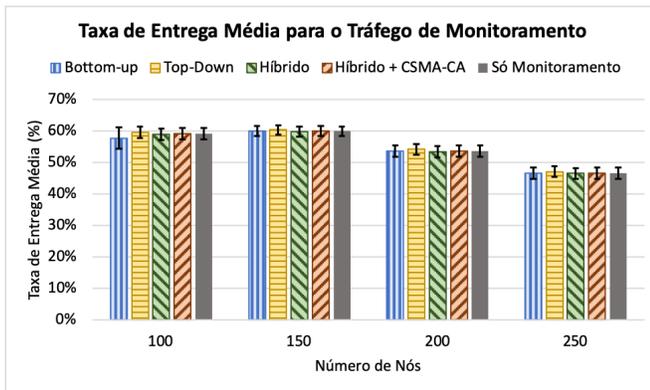


Figura 8. Taxa de entrega média para as mensagens de monitoramento, considerando as diferentes abordagens avaliadas.

monitoramento gerado pelos nós sensores. A ideia básica é combinar um esquema de escalonamento híbrido de *clusters*, que define janelas de oportunidade *Top-Down* para priorizar o fluxo de mensagens *downstream* (tráfego de controle), com um esquema de configuração eficiente dos parâmetros CSMA-CA para os nós coordenadores, que aumenta a probabilidade de acesso ao canal sem fio desses dispositivos, favorecendo uma diminuição do tempo de disseminação e o aumento da taxa de sucesso de entrega de mensagens de controle.

Resultados de simulação mostram que a definição de janelas de oportunidade *Top-Down* para disseminação do tráfego de controle, combinado com uma configuração eficiente dos valores dos parâmetros do algoritmo CSMA-CA para os nós coordenadores, especificamente *macMinBE* e *macMaxBE*, podem reduzir expressivamente os atrasos de comunicação fim-a-fim e aumentar a taxa de entrega para mensagens de controle. Além disso, os resultados mostram que, mesmo adicionando um novo fluxo de dados à rede *cluster-tree*, o mecanismo proposto não impacta de forma relevante no típico tráfego de monitoramento, mesmo em ambientes com uma maior densidade de nós sensores. Assim, o mecanismo proposto neste artigo torna-se uma opção atraente para RSSFs de monitoramento, que necessitam de atividades de controle/atuação periódicas.

Como trabalhos futuros, o mecanismo proposto neste artigo será estendido para uma abordagem orientada a eventos para atividades de controle em RSSFs *cluster-tree*. Com isso, o fluxo de controle só seria configurado de acordo com a necessidade de atuação imposta pelas aplicações.

#### ACKNOWLEDGMENT

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da FAPEPI/MCT/CNPq/CT-INFRA (N° 007/2018 - Programa PPP), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (projeto 443711/2018-6) e da Universidade Federal do Piauí – UFPI (PIBIC – PCCN4910-2018).

#### REFERÊNCIAS

[1] J. A. Stankovic, A. D. Wood, and T. He, “Realistic Applications for Wireless Sensor Networks.” *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks*, no. 25, pp. 835–863, 2011.

[2] M.-H. Afsar, M. Mehdi e Tayarani-N, “Clustering in sensor networks,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 46, no. C, pp. 198–226, Nov. 2014.

[3] A. A. S. Kumar, K. Ovsthus, and L. M. Kristensen, “An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks - A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1391–1412, 2014.

[4] M. H. Rashid, Bushra e Rehmani, “Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 60, no. C, pp. 192–219, Jan. 2016.

[5] IEEE 802.15.4, “IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs),” *IEEE Computer Society*, pp. 1–709, Dec. 2015.

[6] ZigBee, “ZigBee Specification,” ZigBee Alliance (Document 053474r20), Sep. 2012.

[7] C. Li, H. Zhang, B. Hao, and J. Li, “A Survey on Routing Protocols for Large-Scale Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 11, no. 12, pp. 3498–3526, Dec. 2011.

[8] H. Lin, L. Wang, and R. Kong, “Energy Efficient Clustering Protocol for Large-Scale Sensor Networks,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 12, pp. 7150–7160, 2015.

[9] M.-S. Yeh, Lun-Wu e Pan, “Beacon Scheduling for Broadcast and Convergecast in ZigBee Wireless Sensor Networks,” *Computer Communications*, vol. 38, pp. 1–12, Feb. 2014.

[10] A. Koubaa, M. Alves, B. Nefzi, and Y.-Q. Song, “Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for Time-Critical Events in Wireless Sensor Networks,” in *Proceedings of the Workshop of Real-Time Networks (RTN 2006), Satellite Workshop to ECRTS 2006*, Dresden, Germany, Jul. 2006.

[11] L. Constante, J. Lau, R. Moraes, G. Araujo, C. Montez, and E. Leão, “Enhanced association mechanism for IEEE 802.15.4 networks,” in *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sep. 2017, pp. 1–8.

[12] A. Koubaa, A. Cunha, M. Alves, and E. Tovar, “TDDBS: A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for ZigBee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks,” *Real-Time Systems*, vol. 40, no. 3, pp. 321–354, Dec. 2008.

[13] P. Hanzalek, Z e Jurcik, “Energy Efficient Scheduling for Cluster-Tree Wireless Sensor Networks With Time-Bounded Data Flows: Application to IEEE 802.15.4/ZigBee,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 6, no. 3, pp. 438–450, 2010.

[14] R. Severino, N. Pereira, and E. Tovar, “Dynamic Cluster Scheduling for Cluster-tree WSNs,” *SpringerPlus*, vol. 3, no. 1, p. 493, Aug. 2014.

[15] A. Koubaa, M. Alves, and M. Attia, “Collision-free beacon scheduling mechanisms for IEEE 802.15.4/Zigbee cluster-tree wireless sensor networks,” *Technical Report (TR-061104)*, 2006.

[16] F. Xia, J. Li, R. Hao, X. Kong, and R. Gao, “Service Differentiated and Adaptive CSMA/CA over IEEE 802.15.4 for Cyber-Physical Systems,” *Scientific World Journal*, vol. 2013, pp. 1–12, 2013.

[17] E. Leão, C. Montez, R. Moraes, P. Portugal, and F. Vasques, “Superframe Duration Allocation Schemes to Improve the Throughput of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks,” *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 249, Feb. 2017.

[18] E. Leão, V. Vasconcelos, P. Portugal, C. Montez, and R. Moraes, “A hybrid beacon scheduling scheme to allow the periodic reconfiguration of large-scale cluster-tree wsn,” in *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, July 2018, pp. 169–174.

[19] C. Benzaïd, M. Bagaa, and M. Younis, “Efficient clock synchronization for clustered wireless sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 56, pp. 13 – 27, 2017.

[20] A. Ghaffari, “Congestion control mechanisms in wireless sensor networks: A survey,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 52, pp. 101 – 115, 2015.

[21] E. Leão, R. Moraes, C. Montez, P. Portugal, and F. Vasques, “CT-SIM: A simulation model for wide-scale cluster-tree networks based on the IEEE 802.15.4 and zigbee standards,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 3, pp. 1–17, 2017.

[22] Y. Tselishchev, A. Boulis, and L. Libman, “Experiences and lessons from implementing a wireless sensor network mac protocol in the castalia simulator,” in *2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, April 2010, pp. 1–6.