

Uma estratégia para divisão de tarefas entre os nodos buscando o balanceamento de carga em RSSF reativas

Weslen S. Souza, Lisane Brisolara de Brisolara, e Paulo R. Ferreira Jr.

Programa de Pós-Graduação em Computação

Centro de Desenvolvimento Tecnológico

Universidade Federal de Pelotas

Pelotas, Brazil

{wsdsouza, lisane, paulo}@inf.ufpel.edu.br

Resumo—Redes de Sensores sem fio possuem muitas aplicações, dentre elas o monitoramento de ambientes. Algumas destas aplicações requerem o processamento de dados multimídia e os nodos da rede muitas vezes são mantidos por bateria, assim o tempo de vida da rede depende da carga de bateria dos nodos. Técnicas para balanceamento de carga em redes de sensores com redundância na cobertura dos nodos, costumam decidir qual nodo irá executar o processamento, mas não dividem tarefas de processamento entre vizinhos. Neste trabalho, é proposta uma técnica de balanceamento de carga que divide as tarefas de processamento entre nodos, explorando a redundância dos dados detectados no balanceamento da carga. Por meio de um estudo de caso, os resultados da técnica proposta são comparados ao estado-da-arte.

Index Terms—redes de sensores sem fio, balanceamento de carga, divisão de tarefas, eventos multimídia, tempo de vida.

I. INTRODUÇÃO

Redes de Sensores sem Fio (RSSF) são compostas por dispositivos com capacidade de sensoriamento [1], os quais serão distribuídos no ambiente a ser monitorado. Estes dispositivos, chamados nodos, são conectados por meio de canais *wireless*, usualmente suportados por módulos de rádio frequência. A rede formada, devido sobretudo a limitações dos rádios, requer capacidade de adaptação e envio de mensagens com múltiplos saltos para que a informação chegue até uma estação central (sink) [2]. Atualmente, os nodos podem ser equipados com capacidade de processamento local e armazenamento de dados [3]. No entanto, uma preocupação frequente é com a energia consumida pelos nodos, já que estes costumam ser mantidos por baterias.

Ainda, no contexto de redes de sensores que capturam dados multimídia, surgem novos desafios significativos [4]. A transmissão destes dados consome uma quantidade considerável de energia dos nodos, devido ao grande volume de dados associados. O custo associado ao envio de dados multimídia é especialmente elevado em redes Multi Hop, devido ao número de retransmissões requeridas até a mensagem atingir seu destino final. Os protocolos também apresentam limitações quanto ao máximo de bytes que um pacote pode transmitir individualmente, o que contribui para o aumento do número

de transmissões requeridas e consequentemente redução no tempo de vida da rede.

Como os nodos geralmente usam baterias não recarregáveis, economizar energia é crucial em redes de sensores sem fio. Para isso, algumas soluções capturam dados apenas quando um evento é acionado, sendo chamadas de RSSFs reativas. O comportamento reativo e o processamento local ajudam a economizar energia, evitando alto consumo na comunicação. No entanto, ao lidar com multimídia, como áudio para identificação de pássaros, técnicas de economia de energia, como o balanceamento de carga, são necessárias para melhorar a eficiência energética da rede [5].

Técnicas existentes de balanceamento de carga para RSSFs reativas tratam a redundância de sensoriamento, decidindo qual nó deve processar um evento detectado por vários nós [6]. No entanto, não exploram a divisão de tarefas custosas em subtarefas e sua distribuição entre nodos, o que poderia melhorar o balanceamento da carga de processamento. Em [7] foi proposta a técnica TDMEN, a qual divide a carga de processamento referente a um evento entre os nodos vizinhos em RSSFM (Redes de Sensores Sem Fio Multimídia) sem sobreposição de sensoriamento. Como nesta técnica a divisão é feita pelo nodo que detectou, quando houver sobreposição e um mesmo evento for detectado por mais de um nodo, este esquema poderá gerar uma sobrecarga na rede, pois esta não trata a redundância.

Neste artigo, a técnica TDMEN é estendida para dividir e compartilhar tarefas de processamento de dados multimídia em redes com sobreposição de sensoriamento. A técnica proposta aqui explora a redundância de dados para melhorar o balanceamento da carga. A técnica proposta foi avaliada e comparada com outras técnicas de balanceamento de carga usando um estudo de caso de uma RSSFM aplicada na identificação de pássaros por seus cantos. Os resultados indicaram que a técnica proposta estende a vida útil da rede, ampliando o número de eventos processados pela rede.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: Seção II discute trabalhos relacionados; Seção III revisa o *framework* de simulação empregado para implementar e avaliar a técnica

proposta; Seção IV detalha a técnica proposta; Seção V apresenta o estudo de caso empregado para avaliar a técnica, bem como compará-la a outras técnicas existentes na literatura; Seção VI apresenta conclusões e trabalhos futuros.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Dois técnicas bio-inspirados foram propostas para balanceamento de carga em RSSF com sobreposição de sensoriamento: PS (*Pheromone-Signaling* [8] e Ant-based [6]. Ambas estão implementadas no Eboracum. Na técnica PS, os nós utilizam apenas informações localmente disponíveis para decidir se devem ou não processar o evento detectado pelo nó. Essa técnica foi proposta para reduzir a redundância no processamento, evitando que um mesmo evento seja tratado por mais de um nó. O esquema empregado pela técnica, onde abelhas são denominadas rainhas e só estas processam faz com que a sua eficiência dependa do nível de sobreposição entre os sensores.

Com o mesmo objetivo de evitar redundância no processamento, [6] propôs uma técnica baseada no comportamento de Formigas, onde os nodos decidem probabilisticamente quem irá processar um evento. Quando os nós detectam um evento, cada nó decide se deve ou não processar o evento considerando sua probabilidade interna calculada. Em resumo, essa abordagem funciona modificando a probabilidade de um nó processar um evento conforme o número de nós que detectaram esse evento ao mesmo tempo, e o número de vezes que esse nó processou eventos anteriores. Comparado ao PS, a técnica Ant-based alcançou resultados muito próximos daqueles obtidos pelo PS quando seus parâmetros estão bem configurados, com a vantagem de que seu desempenho não ser dependente de um alto nível de sobreposição.

As técnicas PS [8], Ant-based [6] abordagens oferecem um balanceamento de carga limitado, pois determinam apenas qual nodo irá processar completamente a tarefa correspondente ao evento. Em aplicações multimídia, onde a carga de processamento é maior, dividir as tarefas em subtarefas e distribuir essas subtarefas entre os nós vizinhos pode contribuir para preservar a vida útil da rede na totalidade, proporcionando uma carga mais homogênea entre os nós. Em [7] foi proposta a TDMEN, que divide e distribui a carga de processamento entre os nós vizinhos a um salto de distância. A técnica proposta aqui estende o TDMEN para cenários com redundância no sensoriamento. A técnica explora esta redundância, para reduzir o envio de dados multimídia pela rede. A TDMEN estendida consegue ampliar as distribuições de carga, mantendo ainda um salto de distância.

III. EBORACUM

O Eboracum consiste de um *framework* empregado na modelagem e simulação de RSSFs em alto nível de abstração, tendo como principal objetivo a avaliação do tempo da vida da rede, considerando nodos baseados em bateria. Este *framework* foi desenvolvido usando como base o Ptolemy¹ II. O Ptolemy é reconhecido na área de modelagem e simulação de sistemas

embarcados, emprega uma modelagem baseada em atores, os quais são representados por classes Java.

Em uma RSSF, o nó sensor e a estação base podem ser mencionados como componentes principais. Esses componentes são representados no Eboracum, respectivamente, pelas classes *SimpleWSNNode* e *NetworkMainGateway*. Ambas as instâncias dessas classes possuem capacidade de comunicação, onde um parâmetro define o raio de comunicação. As instâncias de *SimpleWSNNode* têm uma carga de bateria, inicializada com a capacidade total da bateria. O nó sensor também tem a capacidade de detectar eventos, onde um parâmetro define o alcance o seu raio de sensoriamento. Além disso, as instâncias de *SimpleWSNNode* também têm a capacidade de processar os dados detectados e enviar uma mensagem resultante pela rede até o Sink, utilizando outros nós para retransmissão.

A classe *SimpleWSNNode* estende a *BasicWirelessSensorNode*, que representa um nó sensor com uma CPU interna para processar tarefas associadas aos eventos capturados. A CPU é representada pela interface que especifica alguns métodos para representar o comportamento geral de uma CPU. Associada à *SimpleWSNNode*, encontra-se uma implementação dessa interface chamada *SimpleFIFOBasedCPU*, que define o comportamento de uma unidade de processamento baseada em um esquema de FIFO (*First In, First Out*).

A avaliação do consumo de energia no Eboracum é dada pela descarga da bateria dos nodos conforme a carga de trabalho associada aos eventos desencadeados pelo simulador. Essa descarga é modelada em três modos de operação diferentes para os nós sensores: inativo (*idle*), processamento e transmissão. Os custos energéticos associados a esses modos caracterizam uma simulação de uma RSSF dedicada a uma aplicação específica. Estes modos básicos foram estendidos para caracterizar a técnica proposta de balanceamento de carga, e assim permitir representar o custo da divisão das tarefas, processamento de subtarefas e mensagens requeridas para o balanceamento da carga.

As simulações geradas no Eboracum são baseadas em eventos discretos, o que permite acelerar consideravelmente o tempo de execução de cada simulação já que as atualizações ocorrem apenas quando há um disparo de evento. Assim, neste modelo a carga de trabalho da aplicação e representada por eventos que acionam os atores.

Para a simulação de eventos, este *framework* dispõem de diversas classes para a representação de fenômenos da natureza, dentre estas, pode-se citar: *PeriodicEvent*, a qual modela a ocorrência de eventos em períodos pré-definidos; *StochasticDailyJumperEvent*, que representa eventos periódicos diários e distribuídos espacialmente seguindo modelos estocásticos. Muitos fenômenos da natureza podem ser representados por distribuições de probabilidade, os quais são empregados nas simulações visando simular a ocorrência destes no tempo e no espaço. No estudo de caso apresentado neste trabalho, a classe *StochasticDailyJumperEvent* é empregada para a representação do comportamento de aves cantando em uma floresta.

¹<https://ptolemy.berkeley.edu>

IV. TÉCNICA DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA

No contexto das Redes de Sensores Sem Fio Multimídia, o envio de dados para o Sink para processamento é proibitivo devido ao considerável volume de dados, cuja transmissão causaria a morte prematura da rede. Para resolver esse problema, o presente trabalho propõe o processamento local combinado com uma estratégia de divisão e distribuição da carga, que explora a redundância de sensoriamento entre nodos. Esta seção apresenta a técnica proposta, bem como detalha sua implementação na infraestrutura Eboracum.

A. Descrição

A TDMEN estendida, é proposta neste artigo, de forma a explorar a redundância espacial para que os nós que capturam o mesmo evento, cooperem no processamento dos dados multimídia. Além de evitar o reprocessamento de dados, a técnica se favorece da redundância espacial, permitindo reduzir as comunicações necessárias para a divisão de tarefas e sua distribuição entre os nodos, bem como ampliar as possibilidades de distribuição com vizinhos a um hop de distância.

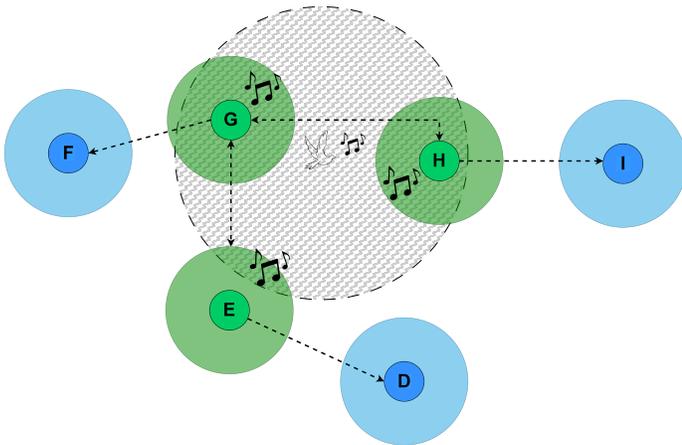


Figura 1. RSSFM com redundância espacial e TDMEN Estendida.

Para detalhar esta técnica será usada uma RSSFM para detecção e identificação de sons de pássaros. A Figura 1 ilustra um cenário desta rede, onde três nodos (H, G e E) detectam simultaneamente o mesmo evento. Em uma RSSFM onde há uma redundância espacial, isto é, onde dois ou mais nodos podem detectar o mesmo evento, a propagação da detecção deste evento pode ser visualizada como uma forma de onda, onde na ilustração os nodos H, G e E detectam o evento, o canto do pássaro, sequencialmente. Isso permite que os nodos H, G e E cooperem para o processamento deste mesmo evento sem a necessidade do envio dos segmentos multimídias, dado que todos já possuem os dados capturados, por detectarem o mesmo evento. Um simples protocolo deve coordenar o trabalho dos nodos para evitar retrabalho.

Um protocolo de comunicação entre nodos foi desenvolvido para a TDMEN Estendida visando a coordenação desta cooperação. A Figura 2 ilustra um exemplo do emprego deste protocolo para a rede da Figura 1. Quando os nodos

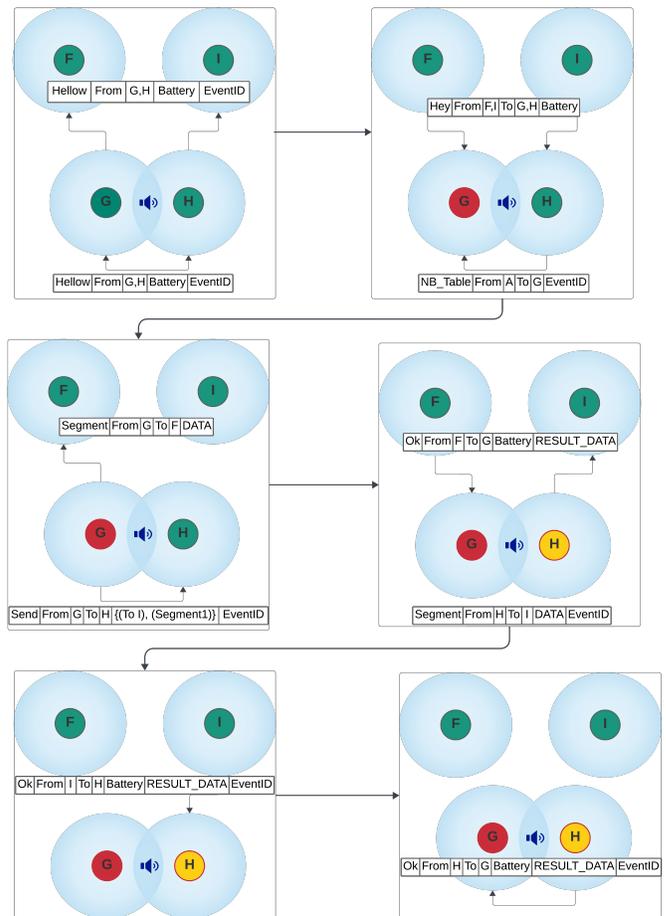


Figura 2. Fluxo de comunicação adotado pela TDMEN Estendida.

detectam um evento (G e H), eles enviam uma mensagem de broadcast 'Hello' aos seus vizinhos, contendo um identificador do evento e a informação da sua bateria. Se os vizinhos (F e I) não detectaram o mesmo evento, eles respondem com uma mensagem 'Hey', informando sua bateria e disponibilidade para colaborar.

O nó com mais bateria entre os detectores do evento torna-se o Mestre (G), responsável por decidir quais nós processarão os dados do evento. O nó escravo (H) que detectou o mesmo evento de G, fornece uma tabela dos seus vizinhos ao Mestre, que usa essa informação para delegar tarefas de processamento de dados aos nodos mencionados na tabela. O Mestre envia segmentos dos dados aos nós vizinhos (F e I) para processamento, evitando retransmissões de longa distância e economizando energia.

O nó F processa os dados e retorna o resultado ao Mestre, enquanto o nó H encaminha o segmento ao nó I, que também processa e envia o resultado de volta ao nó H. Este, por sua vez, retorna o resultado ao Mestre (G).

Este protocolo permite um processamento colaborativo eficiente, reduzindo o consumo energético e aumentando a lista de nós que podem colaborar no processamento de dados,

```

1 while hasBattery do
2   event ← waitSenseEvent();
3   if event then
4     for all node nodID in neighborhood do
5       | sendMessage(nodID, tag, msgData); // send Hello tag
6   while msg ← waitMessage() do
7     for all proTag proc in protocolResolver do
8       | proc.resolve(msg.getTag(), msg.data()); // get tag and do

```

Figura 3. Algoritmo da técnica proposta.

melhorando o balanceamento de carga na rede.

O pseudocódigo da Figura 3 representa a sequência básica executada por cada um dos nós da rede quando a técnica de balanceamento de carga TDMEN estendida está sendo empregada. Na linha 1, o nodo verifica se ainda possui bateria para executar tarefas; já na linha 2, o fluxo de execução aguarda a detecção de um evento. Nas linhas 3, 4 e 5, o algoritmo verifica se um evento foi detectado. Caso afirmativo, o nó que detectou o evento notifica seus vizinhos por meio de uma tag, indicando o sensor que fez a detecção, incluindo informações básicas sobre a identificação do evento na mensagem. Finalmente, nas linhas 6, 7 e 8, o nó verifica se recebeu alguma mensagem de seus vizinhos. Se tiver recebido, ele identifica, por meio da tag na mensagem, qual tarefa deve executar, seja processar um evento ou sinalizar sua disponibilidade.

B. Implementação

A técnica foi implementada no framework *Eboracum*, para permitir sua avaliação e comparação com outras técnicas já estudadas pelo grupo de pesquisa. O diagrama de classes da Figura 4 ilustra as classes empregadas e seus relacionamentos. Esta implementação baseou-se na criação de duas novas classes: a *TaskDivisionIntersecProtocol*, *EventControlData* e *Protocol* as quais executam a seguinte função: (I) **TaskDivisionIntersecProtocol** - classe desenvolvida com a extensão da classe *TaskDivisionWithCacheWSNNode*, apresentada em [7]. Esta classe representa cada um dos nodos da rede, executando o envio, recebimento e o processamento das mensagens empregadas pela TDMEN estendida; (II) **EventControlData** - classe que armazena os segmentos de um evento e os demais dados agregados a este; (III) **Protocol** - representado aqui como uma interface a qual deve designar o que cada uma das tags de mensagens do fluxo de comunicação deve simular, seja processar um segmento ou encaminhar o mesmo a outro nodo.

V. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Os experimentos conduzidos para avaliar a técnica TDMEN estendida em um cenário de aplicação real, com redundância nos raios de sensoriamento dos nodos, são detalhados nesta Seção. Para executar os experimentos de simulação, um modelo da aplicação foi construído e a caracterização da aplicação para consumo energético foi realizada, os quais são apresentados na Seção V-A. Os resultados experimentais são apresentados e discutidos na Seção V-B.

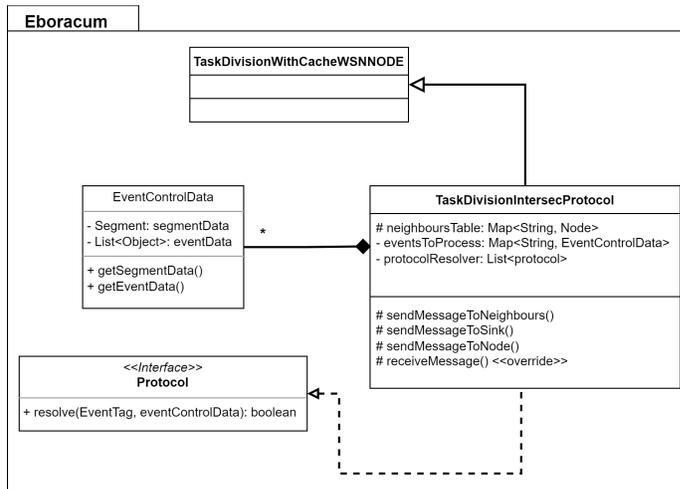


Figura 4. Diagrama de Classes para a implementação da TDMEN estendida.

Para realizar as comparações com diferentes técnicas de balanceamento de carga ou mesmo a uma rede sem balanceamento, a caracterização do consumo precisou ser revista devido às diferentes operações derivadas da divisão do processamento. Em todas as comparações, a configuração do cenário da rede como número de nodos, raios de sensoriamento e de comunicação foram mantidos idênticos, no entanto, como os eventos são lançados por meio de modelos de probabilidade, os experimentos foram repetidos trinta vezes e os valores médios de cada execução foram analisados. Testes estatísticos foram realizados para comprovar que haviam diferenças significantes em cada comparativo.

A. Modelagem da Simulação

O estudo de caso considera uma RSSFM empregada no monitoramento e identificação de pássaros. O evento que gatilha os nós reativos da rede de sensores representa um canto (um som). Os eventos aparecem no espaço seguindo uma distribuição Uniforme e a frequência dos eventos é dada por uma distribuição de Poisson, com um intervalo de ocorrência entre eventos de [1,100] segundos. A carga de processamento desta aplicação refere-se ao processamento do áudio capturado para identificação de padrão em sons de pássaros.

Cada nodo da rede possui a bateria (inicializada com a carga de 25200000mAs), uma CPU (Raspberry Pi III), um módulo de comunicação (XBee S2C), um microfone e um sensor de ruído. Este sensor de ruídos captura a ocorrência de algum som ambiente e ativa posteriormente o microfone para gravação.

Para auxiliar na caracterização destas operações de processamento, foi empregada a API BirdNET-Analyzer² [9], a qual permite o uso de Inteligência Artificial para a identificação de mais de 6000 espécies de pássaros ao redor do mundo. Esta API provê ainda funcionalidades úteis para a técnica de divisão de tarefas, como a segmentação de áudio. Para estimar os custos envolvidos nas principais tarefas da aplicação, a

²<https://github.com/kahst/BirdNET-Analyzer>

API BirdNET-Analyzer foi previamente instalada na CPU Raspberry Pi III. Experimentos foram realizados para avaliar o tempo de processamento requerido por estas tarefas. Os experimentos consideraram uma amostra de áudio que representava 120 segundos, durante os quais haviam 7 pássaros cantando, totalizando 320 000 bytes de informação.

Os custos energéticos das operações dos nodos com o emprego da TDMEN estendida são também válidos para a TDMEN original, e estão resumidos na Tabela I. Com a divisão de tarefas proposta pela TDMEN é preciso separar o curso do pré-processamento (segmentação do áudio) do custo do processamento de cada segmento, ou identificação do pássaro responsável pelo som. O consumo estimado para realizar o pré-processamento do áudio de 120 segundos foi de 6560 mAs (PREPROCESSING), considerando o tempo (8,2 s) requerido pela CPU para segmentar este áudio e a corrente média da CPU (800 mA). O tempo de execução requerido para identificar o pássaro responsável pelo som é aproximadamente 6,204 segundos. Assim, considerando a corrente média, determinouse o custo PROCESSING_SEGMENT (4963 mAs/s).

Para estimar o consumo referente as operações de transmissão foram considerados dados do *datasheet* do Xbee S2C, como a taxa de transmissão (250 Kbps) e a corrente empregada pelo transmissor (33 mA), bem como informações do protocolo ZigBee tais como tamanho de cabeçalho e pacotes. O segmento de áudio considerado em nosso estudo de caso foi de 8000 Bytes, correspondente ao canto de 7 diferentes pássaros. Este segmento é obtido após o pré-processamento do áudio base de 120 segundos, o qual gera 7 segmentos contendo 3 segundos de duração. Considerando o *payload* máximo (104 Bytes) e o tamanho do cabeçalho (24 bytes), foi determinado o volume de dados a ser transmitido (9848 Bytes). Considerando este volume, a taxa de transmissão e a corrente do transmissor definiu-se o custo energético da transmissão do segmento (10,23 mAs) denominado SEND_SEGMENT.

Os custos das operações de SEND_DISCOVERY e SEND_APP_MESSAGE consideram o envio de 36 Bytes e a mesma taxa de transmissão e corrente já mencionadas. O custo SEND_DISCOVERY está relacionado ao envio de uma mensagem de inicialização da rede, usada para o preenchimento da tabela de vizinhos de cada nodo. Já o custo SEND_APP_MESSAGE refere-se ao envio de uma mensagem com o resultado do processamento do evento pela rede. Já o custo de IDLE_COST, está associado ao consumo do nodo quando este não está processando e nem transmitindo mensagens, mas habilitado a capturar eventos e receber mensagens.

Na Tabela II, são apresentados os custos empregados para as demais técnicas (PS, Ant e Sem balanceamento). Nessas Técnicas, como um único nodo executa todo o processamento do evento, não há segmentação e não há operação de envio de segmentos e nem de envio de mensagens de cooperação entre nodos. Assim, o PROCESSING_EVENT refere-se a todo o processamento do áudio. Este custo foi calculado considerando o tempo de CPU requerido para executar esta tarefa (51,63 segundos) e a corrente consumida (800 mA), totalizando os 41304 mAs. Para os custos de SEND_APP_MESSAGE e

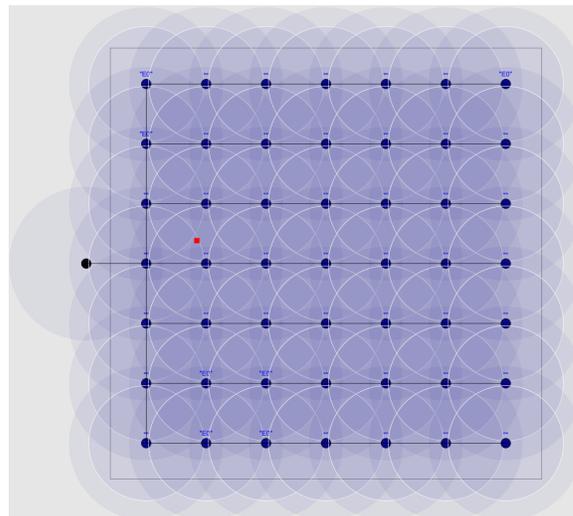


Figura 5. Cenário de simulação da aplicação de monitoramento de pássaros.

IDLE_COST foram considerados os mesmos valores.

Tabela I
CUSTO DE TAREFAS CONSIDERANDO DIVISÃO DE CARGA.

Nome da Tarefa	Custo
SEND_SEGMENT	10,23 mAs
SEND_DISCOVERY	0,038016 mAs
SEND_APP_MESSAGE	0,038016 mAs
IDLE_COST	0,1 mAs
PREPROCESSING	6560 mAs
PROCESSING_SEGMENT	4963 mAs

Tabela II
CUSTO TAREFAS RSSFM COM PS, ANT E SEM BALANCEAMENTO.

Nome da Tarefa	Custo
SEND_APP_MESSAGE	0,038016 mAs
IDLE_COST	0,1 mAs
PROCESSING_EVENT	41304 mAs

Estes custos estimados foram então incorporados aos modelos de simulação empregados para avaliar as soluções de rede com diferentes técnicas de balanceamento e sem balanceamento no Eboracum.

A Figura 5 ilustra uma tela da simulação da RSSF dedicada ao monitoramento de pássaros. A rede é composta de 49 nodos dispostos de modo a permitir que até 3 nodos detectem um mesmo evento, ou seja, o mesmo canto. O quadrado representa a área de interesse e o nodo posicionado fora desta área representa a estação base da rede. Cada nodo sensor possui dois raios em volta, um de sensoriamento e outro sombreado de comunicação (raio maior). A distribuição espacial dos eventos na rede é uniforme, podendo ocorrer com a mesma probabilidade em qualquer posição da área de interesse.

B. Resultados Experimentais

Esta seção discute os resultados obtidos pela TDMEN estendida quando aplicada em uma RSSFM dedicada ao

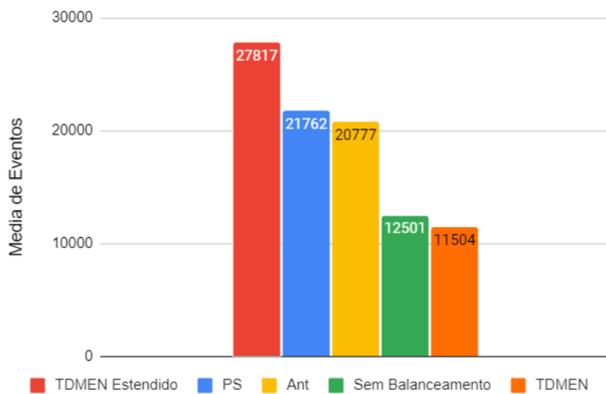


Figura 6. Comparação da média de eventos detectados.

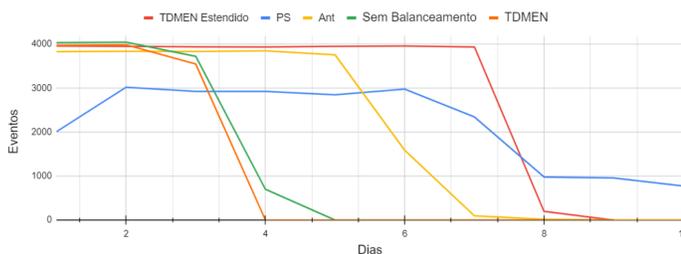


Figura 7. Comparativo de detecção de eventos por dia.

monitoramento de pássaros. Estes resultados são comparados aos resultados da TDMEN original, com resultados da mesma rede sem adoção de nenhuma técnica de balanceamento de carga, e por fim, aos resultados obtidos adotando as técnicas Ant e PS.

O gráfico da Figura 6 ilustra as médias de eventos sensorados pelas técnicas avaliadas durante as 30 repetições executadas. Estes resultados apontam que, das cinco técnicas, a TDMEN estendida foi a que sensorou mais eventos, detectando aproximadamente 28% mais eventos do que a técnica PS, 34% mais do que a Ant. Ainda a TDMEN estendida, sensorou em média 142% mais eventos que a TDMEN original, que não tratava a redundância espacial, e 123% mais do que a rede que não realiza nenhum balanceamento de carga.

Analisando as médias de eventos detectados por dia em cada uma das redes, a TDMEN estendida prolongou a vida útil da rede nos experimentos realizados, como ilustrado no gráfico da Figura 7. Nossos resultados comprovaram que a TDMEN original, por não evitar o processamento do mesmo evento por diferentes nodos, não tem resultados efetivos em cenários com redundância no sensoriamento apesar de também aplicar a divisão e distribuição de tarefas de processamento. No cenário do estudo de caso, a TDMEN original apresentou um desempenho pior do que o da rede sem nenhuma técnica de balanceamento de carga.

Apesar da técnica PS prolongar a rede por mais dias, muitos eventos são perdidos devido a sua dependência da redundância de sensoriamento ente nodos. A TDMEN estendida, proposta neste trabalho, manteve todos os nós da rede vivos por 17%

mais tempo do que a técnica PS, 40% mais do que a Ant e 250% mais do que uma RSSF sem balanceamento. Assim, a TDMEN estendida foi a técnica mais eficiente para este cenário de aplicação.

VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo propôs a extensão da TDMEN para RSSF Multimídia com sobreposição de cobertura de sensoriamento. A técnica divide a carga de trabalho gerada por um evento detectado, distribuindo as subtarefas resultantes para os nós sensores vizinhos, explorando detecções redundantes para ampliar o balanceamento da carga com menor custo de comunicação. Os resultados experimentais demonstraram que a técnica TDMEN estendida sensorou 28% mais eventos do que a técnica PS, 34% mais do que a Ant, 123% mais do que a rede sem balanceamento de carga e 142% mais eventos que a TDMEN original. Ainda, a TDMEN estendida prolonga a vida da rede, mantendo todos os nós da rede vivos por 17% mais tempo do que a técnica PS, 40% mais do que o Ant e 250% mais do que uma rede sem balanceamento ou que adote a TDMEN original. Como trabalhos futuros, pretende-se realizar experimentos envolvendo outros cenários de aplicações reais. Além disso, planeja-se investigar o uso de estratégias bioinspiradas à abordagem TDMEN de modo a reduzir o número de troca de mensagens requeridas pela técnica.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001 e FAPERGS Techfuturo - 23/2551-0002199-4.

REFERÊNCIAS

- [1] O. I. Khalaf and B. M. Sabbar, "An overview on wireless sensor networks and finding optimal location of nodes," *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, vol. 7, no. 3, pp. 1096–1101, 2019.
- [2] K. Bairagi, S. Mitra, and U. Bhattacharya, "Coverage aware dynamic scheduling strategies for wireless video sensor nodes to reduce energy consumption," in *11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. IEEE, 2020, pp. 1–7.
- [3] F. Karray, M. W. Jmal, A. Garcia-Ortiz, M. Abid, and A. M. Obeid, "A comprehensive survey on wireless sensor node hardware platforms," *Computer Networks*, vol. 144, pp. 89–110, 2018.
- [4] R. Chiwariro *et al.*, "Quality of service aware routing protocols in wireless multimedia sensor networks: survey," *International Journal of Information Technology*, pp. 1–12, 2020.
- [5] I. A. Pereira, L. B. d. Brisolara, and P. R. Ferreira, "Application-level load balancing for reactive wireless sensor networks: An approach based on constraint optimization problems," in *Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*. Springer, 2020, pp. 63–76.
- [6] P. R. Ferreira, L. Brisolara, and L. S. Indrusiak, "Decentralised load balancing in event-triggered wsns based on ant colony work division," in *41st Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEEA)*. IEEE, 2015, pp. 69–75.
- [7] W. S. Souza, L. B. de Brisolara, and P. R. Ferreira, "Load balancing based on multimedia task division for reactive wsns: Case study for pest management," in *2022 XII Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC)*. IEEE, 2022, pp. 1–8.
- [8] I. Caliskanelli, J. Harbin, L. S. Indrusiak, P. Mitchell, F. Polack, and D. Chesmore, "Bioinspired load balancing in large-scale wsns using pheromone signalling," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 9, no. 7, p. 172012, 2013.
- [9] C. Pérez-Granados, "Birdnet: applications, performance, pitfalls and future opportunities," *Ibis*, 2023.