

ADELICIO BIAZI

**ALGORITMO BASEADO EM TDMA SLEEP
SCHEDULING COM TIME-SLOT FLEXÍVEL PARA
REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do
Rio Grande do Sul.

Orientador: Profa. Dra. Letícia Maria Bolzani
Poehls

Porto Alegre - RS

2015



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ALGORITMO BASEADO EM TDMA SLEEP SCHEDULING COM TIME-SLOT FLEXÍVEL PARA REDES DE SENSORES SEM FIO

CANDIDATO: ADELICIO BIAZI

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DRA. LETÍCIA MARIA BOLZANI POEHLIS - ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA

DR. CÉSAR AUGUSTO MISSIO MARCON - FACIN - FACULDADE DE INFORMÁTICA - PUCRS

DR. FABIAN LUIS VARGAS - PPGE - FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3320.3540 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.eletrica@pucrs.br

www.pucrs.br/feng

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha orientadora Dra. Letícia Maria Bolzani Poehls, pela paciência, pelos ensinamentos e pela orientação ao desenvolvimento deste trabalho, da mesma forma agradeço ao professor Dr. César Augusto Missio Marcon e Dra. Thais Webber que gentilmente assumiram a função de direcionar-me ao caminho da ciência, pois suas ajudas foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço ao Dr. Fabian Luis Vargas e ao Dr. Aurélio Tergolina Salton por fazerem parte da banca de avaliação deste trabalho. Também agradecemos a todos meus colegas e professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE).

RESUMO

A tecnologia associada a nodos sensores passou por uma grande evolução nos últimos anos, principalmente devido ao avanço nas técnicas de fabricação de dispositivos eletrônicos. Esse fato, em conjunto com a evolução da tecnologia de comunicações sem fio, tornou possível o uso de Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) nos mais diversos tipos de aplicações.

Apesar de vantagens tais como capacidade de monitorar zonas de difícil acesso, o uso de RSSF em determinados tipos de aplicações pode ser inviável devido fundamentalmente a restrições associadas ao fornecimento de energia. Basicamente, devido a usual baixa capacidade de armazenamento das baterias presentes nos nodos sensores; a vida útil da rede passa a ser afetada. Em muitas implementações a área ocupada pelo módulo de fornecimento de energia chega a ocupar aproximadamente 50% da área total do nodo. Outro ponto importante a ser salientado é que além de uma unidade de bateria, o fato da rede ser usualmente utilizada para monitorar regiões de difícil acesso, faz com que a substituição das mesmas seja totalmente inviável.

Neste contexto, este trabalho propõe duas contribuições que visam de alguma forma maximizar o tempo de vida útil dos nodos presentes em uma RSSF quando aplicada em sistemas críticos, onde a variação do ambiente pode causar algum prejuízo ou mesmo perigo à humanidade. Em um primeiro momento, esta dissertação de mestrado propõe um modelo energético para mensurar a eficiência do protocolo de acesso ao meio. Em um segundo momento, desta dissertação de mestrado, tem como objetivo desenvolver um novo protocolo de acesso ao meio baseado na flexibilização da frequência de coleta de informações do ambiente. Essa flexibilização será implementada baseada na ideia de *Time Division Multiple Access (TDMA)*. Desta forma, será possível reduzir o consumo de energia e conseqüentemente, aumentar a vida útil do sistema como um todo.

Palavras chaves: Redes de Sensores Sem Fios. Protocolo de Acesso ao Meio. Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo. Consumo de Energia. Sistemas Críticos.

ABSTRACT

The sensors devices obtained a great evolution in recent years, primarily due to the advancement of manufacturing techniques of electronic devices. And with the evolution of wireless communications techniques, it has been possible to implement wireless sensor networks in numerous types of applications.

One of the biggest issues concerning these systems is their limited energy supply during field operation. The sensors forming such network possess little capacity to store energy, this is due to their need to be reduced in size. Anyhow, the area occupied by the power supply system in many designs is responsible for about 50% of the device's total area.

In this context, this work presents two contributions regarding energy consumption in wireless sensor networks when applied to critical systems, ie where environmental variation can cause injury, danger or tragedy to humanity. First, this dissertation presents an energy model for measuring the effectiveness of the medium access protocol that will be the second purpose of this dissertation. This protocol aims to add flexibility to the frequency of collection of environmental information, which in turn is based on Time Division Multiple Access (TDMA). In this way energy consumption can be reduced and consequently the system's lifetime is increased.

Keywords: Wireless Sensor Networks. Media Access Control Protocol. Time Division Multiple Access. Energy consumption. Critical systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura básica de um sensor wireless	18
Figura 2 – Representação gráfica de um modelo topológico de RSSF	20
Figura 3 – Topologias de RSSF	21
Figura 4 – Modelo de camadas em RSSF	22
Figura 5 – Unidades consumidoras de energia	35
Figura 6 – Processo de consumo de energia	36
Figura 7 – Modelo energético simplificado da unidade de sensoriamento	37
Figura 8 – Máquina de estado da unidade de processamento com valores equivalente ao MSP430	38
Figura 9 – Máquina de estados para o MCU MSP430	39
Figura 10 – Máquina de estados para leitura e escrita na memória	41
Figura 11 – Máquina de estado da unidade de RF(CC2500), t corresponde ao tempo e U corresponde a tensão elétrica	46
Figura 12 – Acesso ao meio por divisão de tempo baseado em TDMA	50
Figura 13 – Algoritmo da média harmônica	50
Figura 14 – Obtenção do tempo de propagação entre CH e SNs	53
Figura 15 – Representação do Frame 802.15.4 transmitido entre CH e SNs	53
Figura 16 – Fluxograma básico de simulação	55
Figura 17 – Interface gráfica para configuração do modelo energético dos sensores	56
Figura 18 – Representação dos objetos e seus respectivos métodos do ambiente de simulação	57
Figura 19 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	59
Figura 20 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	61
Figura 21 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	62
Figura 22 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	63

Figura 23 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	64
Figura 24 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	65
Figura 25 – Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação	66
Figura 26 – Representação gráfica da média aritmética de cinco simulações de um dos dez sensores de umidade do solo. O consumo de energia corresponde aos valores do sensor de umidade do solo, HOBOnode com 2,4 GHz de frequência (INSTRUMENTS, 2009)	68
Figura 27 – Representação gráfica da média aritmética de cinco simulações de um dos dez sensores de temperatura. O consumo de energia corresponde aos valores de rádio do CC2500 com 2.4GHz de frequência com microcontrolador MSP430 (INSTRUMENTS, 2009)	70
Figura 28 – Representação gráfica do monitoramento do vulcão Gorgona na Ilha Gorgona da Colômbia, pela Rede Sismográfica Nacional de Colombia (RSNC)	71
Figura 29 – Apresenta o consumo de energia para uma simulação do intervalo sombreado da Figura 28. O consumo de energia corresponde aos valores do sensor TMote Sky com o rádio CC2420 operando a 2,4 GHz de rádio frequência com microprocessador MSP430F1611 (SKY, 2006)	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das características dos trabalhos relacionados	32
Tabela 2 – Equações do consumo de potência da unidade de processamento, versão resumida (MSP430 com $U=3V$)	40
Tabela 3 – Valores de consumo de energia na unidade de RF	43
Tabela 4 – Índice de interferência do meio	45
Tabela 5 – Distância de alcance em relação à potência do sinal e o ambiente de transmissão	45
Tabela 6 – Critério de escolha para troca de estados (<i>sleep</i> ou <i>idle</i>)	47
Tabela 7 – Consumo de energia na transição e na permanência dos estados <i>sleep</i> e <i>run</i> da máquina de estado do microcontrolador	62
Tabela 8 – Redução no consumo de energia quando aplicado um critério de seleção de dados, em relação ao TDMA clássico	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D -	Conversor Analógico / Digital
ADV -	Advertisement packet
BS -	Base Station
CDMA -	Code Division Multiple Access
CH -	Cluster Header
CRC -	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CA -	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS -	Clear To Send
DCTC -	Dynamic Convey Tree-based Collaboration
DSR -	Dynamic Source Routing
EMAC -	medium access protocol especially
FDMA -	Frequency Division Multiple Access
FSM -	Finite State Machine
GPS -	Global Positioning System
ID -	Identification
LEACH -	Low-Energy Adaptative Clustering Hierarchy
LPM -	Low Power Model
MAC -	Media Access Control
MCU -	Microcontroller Unit
PLL -	Phase Lock Loop

QoS -	Quality of service
RBS -	Reference-Broadcast Synchronization
REQ -	Request
RF -	Radio Frequency
RSSF -	Redes de Sensores Sem Fio
RTS -	Request To Send
Rx -	Receive
SN -	Sensor Node
SMAC -	Sensor Medium Access Control
Tx -	Transmit
TDMA -	Time Division Multiple Access
WOR -	Wake On Radio
WSN -	Wireless Sensor Network
XOSC -	Crystal Oscillator
S-OSTR -	Sensor ordered-subset transmission

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	CONTRIBUIÇÃO	16
1.3	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	NODO SENSOR	17
2.1.1	Arquitetura básica de um sensor	17
2.1.2	Consumo de energia nos nodos	18
2.2	RSSF	19
2.2.1	Topologias de RSSF	20
2.2.2	Modelo de camadas em RSSF	21
2.3	CAMADA DE ENLACE	23
2.3.1	Frequency Division Multiple Access (FDMA)	23
2.3.2	Code Division Multiple Access (CDMA)	24
2.3.3	Time Division Multiple Access (TDMA)	24
2.3.4	Carrie Sense Multiple Access Collision Avoidance (CSMA/CA)	24
2.4	SIMULADORES DE RSSF	25
2.4.1	GloMoSim/QualNet	25
2.4.2	OPNET Modeler wireless suite	26
2.4.3	OMNET++	26
2.4.4	NS-2	26
2.4.5	J-Sim	27
2.4.6	EmStar	27
2.4.7	WiNeS	27
2.5	SISTEMAS CRÍTICOS	28
2.6	TRABALHOS RELACIONADOS AO MODELO ENERGÉTICO	29
2.7	TRABALHOS RELACIONADOS AO TDMA	30

3	PROPOSTA	34
3.1	ESPECIFICAÇÃO DO MODELO ENERGÉTICO	34
3.1.1	Modelo de energia para o módulo de sensoriamento (ME_S)	36
3.1.2	Modelo de energia para o módulo de processamento MCU (ME_MCU)	38
3.1.3	Modelo de energia para o módulo de memória (ME_M)	40
3.1.4	Modelo de energia para o módulo de RF (ME_RF)	41
3.2	ESPECIFICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO	48
3.2.1	Protocolo de Acesso ao Meio Baseado em TDMA Sleep Scheduling	48
3.2.2	Sincronização dos relógios em TDMA	51
3.3	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA VALIDAÇÃO	53
4	AVALIAÇÃO	60
4.1	AVALIAÇÃO DO MODELO ENERGÉTICO	60
4.1.1	Modelo energético da unidade de sensoriamento	60
4.1.2	Modelo energético da unidade de processamento	61
4.1.3	Modelo energia da unidade de memoria	63
4.1.4	Modelo de energia da unidade de rádio frequência	64
4.1.5	Análise do conjunto de modelos energéticos	65
4.2	AVALIAÇÃO DO NOVO PROTOCOLO BASEADO EM TDMA	66
4.2.1	Simulação do cenário A	66
4.2.2	Simulação do cenário B	69
4.2.3	Simulação do cenário C	70
4.2.4	Comparação de resultados	72
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
5.1	CONCLUSÃO	74
5.2	TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76

ANEXOS **81**

	Anexo A – Protocolos de roteamento para RSSF	82
A.1	Baseado em dados	82
A.2	Baseado em roteamento hierárquico	83
A.3	Baseados em localização	84
A.4	Baseado em roteamento proativos	84
A.5	Baseado em roteamento reativo	85
	 Anexo B – Características essenciais em RSSFs	 86
B.1	Tolerância a falhas	86
B.2	Autenticidade	86
B.3	Confidencialidade	86
B.4	Integridade	87
B.5	Escalabilidade	87
B.6	Reduzido consumo de energia	87

1 INTRODUÇÃO

Avanços na tecnologia de comunicação sem fio e eletrônica tornaram possível o desenvolvimento de nodos sensores pequenos, com baixo consumo de energia e multifuncionais. Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são compostas por nodos dotados da capacidade de sensoriamento, de processamento de dados e de comunicação, com seu funcionamento baseado no uso de baterias. Em mais detalhes, esses nodos são capazes de coletar diferentes tipos de dados e de estabelecer algum tipo de comunicação com os demais nodos da RSSF. Todas essas características fizeram com que o uso de RSSF crescesse significativamente nos mais diferentes contextos, tanto em aplicações civis quanto militares.

No âmbito de RSSF, uma das maiores preocupações está relacionada à longevidade, ou seja, quanto tempo o sistema consegue permanecer monitorando o ambiente sem a necessidade de intervenção humana para troca do sistema que provê energia. Fontes como a de processamento, memória e bateria são consideradas restritas, uma vez que a substituição das mesmas é inviável devido ao fato de que usualmente RSSF são utilizadas em ambientes considerados de difícil acesso. Assim, em um cenário onde os nodos operam com baterias limitadas, técnicas capazes de minimizarem o consumo de energia são consideradas essenciais. Convém mencionar que o uso de uma elevada potência de transmissão não somente reduz o tempo de vida da rede, bem como pode eventualmente introduzir diferentes níveis de interferência ao sistema. Assim, a fim de maximizar o tempo de vida da RSSF, faz-se necessário o uso do mais baixo nível possível de potência de transmissão que garanta a conectividade e a confiabilidade da rede. Em outras palavras, sistemas críticos baseados em RSSF devem, além da qualidade de serviço, do inglês *Quality of Service* (QoS), garantir que sejam respeitados aspectos como velocidade de resposta e integridade dos dados coletados e transmitidos.

Diferentes técnicas capazes de minimizar o consumo de energia da rede foram propostas na literatura e serão explorados em mais detalhes no Capítulo 2, que aborda a fundamentação teórica associada a este trabalho.

Neste contexto, este trabalho de mestrado propõe a especificação, implementação, validação e avaliação de um algoritmo capaz de minimizar o consumo de energia do nodo sensor e conseqüentemente, aumentar o tempo de vida útil da rede como um todo. Além

disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de energia para quantificar o consumo de energia através de simulação com um grau de detalhamento mais próximo do real, e conseqüentemente poder avaliar o desempenho e explorar possíveis cenários da rede modelada antes de realizar uma implantação real.

1.1 OBJETIVOS

RSSF podem ser utilizadas em diferentes contextos, tais como no controle de umidade do solo, na indústria, em ambientes hospitalares. Entretanto, para que esse tipo de rede seja economicamente viável a mesma deve permanecer em funcionamento por um longo período de tempo. Por conseguinte, tem-se como objetivo deste trabalho de mestrado o desenvolvimento de um algoritmo capaz de aumentar o tempo de vida útil de RSSF a partir da redução do consumo de energia. Em mais detalhes, esse algoritmo baseia-se no uso de um TDMA *Sleep Scheduling* com flexibilização de *time-slot*. A principal ideia por trás do algoritmo proposto é reduzir o consumo de energia quando as variáveis em análises encontram-se estáveis. Assim, ao aproximar-se de um valor considerado crítico de valores coletados, o algoritmo deve intensificar o sensoriamento e assim aumentar a observabilidade do ambiente. Especificamente, o algoritmo proposto é ideal para RSSF utilizadas para o monitoramento de estruturas ou ambientes críticos que exijam uma reação imediata da rede na presença de um determinado evento. Além disso, esta dissertação de mestrado também prevê o desenvolvimento de um modelo genérico de energia para uma classe específica de nodos sensores. Esse modelo permitira quantificar o consumo de energia de cada componente presente no nodo e desta forma validar o novo algoritmo de acesso ao meio proposto. Assim, baseado nesses objetivos, a seguir são descritos os objetivos específicos deste trabalho:

- Domínio das características físicas de um nodo sensor para criação do modelo energético:
 - Consumo de energia em diferentes partes do hardware;
 - Comportamento do hardware quanto ao sensoriamento, processamento, memória e Rádio Frequência (RF).
- Domínio de protocolos de RSSF:

- Protocolos de roteamento;
- Método de acesso ao meio do tipo TDMA.

1.2 CONTRIBUIÇÃO

Este trabalho tem como principal contribuição o desenvolvimento de um novo algoritmo ou protocolo de acesso ao meio, TDMA *Sleep Scheduling* com flexibilização quanto ao tamanho do *slot*, baseado no fluxo de dados do ambiente. A flexibilização do tamanho do *slot* permite que a frequência de monitoramento seja intensificada a partir do momento em que um ou mais nodos observem uma determinada variação no ambiente, ou reduzida nos demais momentos. Como segunda contribuição, prevê-se a criação de um modelo de energia para avaliar a relação de custo-benefício do novo algoritmo. Desta forma, com esse novo algoritmo de acesso ao meio baseado em TDMA é possível reduzir o consumo de energia quando o sistema encontra-se em um estado de estabilidade, ou seja, sem uma variação significativa nas variáveis monitoradas.

1.3 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento foi subdividido em 7 capítulos conforme listado abaixo: começando com este capítulo que introduz o assunto, o segundo capítulo descreve a fundamentação teórica e relata o estado da arte de trabalhos relacionados à redução no consumo de energia, o terceiro capítulo é utilizado para descrever o projeto e implementação do modelo energético e do novo protocolo baseado em TDMA. O Capítulo 4 apresenta o método de validação do novo protocolo, a avaliação dos resultados e comparação com o estado da arte será apresentado no Capítulo 5, o Capítulo 6 descreve uma conclusão e reflexão sobre trabalhos futuros, por fim, o Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas para a confecção deste projeto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve as principais tecnologias envolvidas no estudo de RSSF, descrevendo conceitos sobre: Nodo sensor e sua arquitetura básica; RSSF; topologias de redes; técnicas capazes de garantir um sistema robusto; protocolos de roteamentos; métodos de acesso ao meio, bem como modelos de energia. Além disso, será apresentado neste capítulo o estado da arte relacionado à RSSF, ou seja, serão descritas técnicas propostas na literatura que visam a reduzir o consumo de energia.

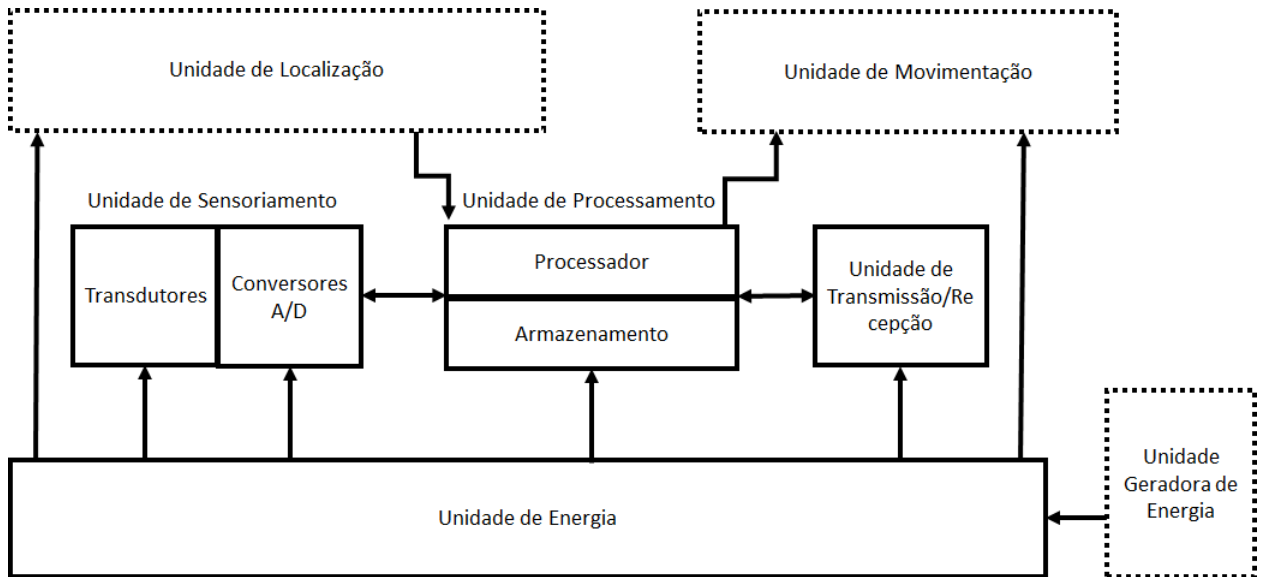
2.1 NODO SENSOR

Um nodo sensor é tipicamente um dispositivo eletrônico de pequeno porte, com baixo custo de fabricação, reduzido consumo de potência e com fonte de energia limitada, além disso, sensores *wireless* devem conter um módulo de rádio frequência capaz de receber e transmitir informações.

2.1.1 Arquitetura básica de um sensor

A Figura 1 apresenta a arquitetura básica de um sensor *wireless*. Seu funcionamento pode ser descrito como segue: i) Uma unidade de transmissão e recepção, responsável por receber informação oriunda da rede e transmitir ao processador ou receber do processador e transmitir à rede; ii) Uma unidade de processamento que é composta por uma unidade de armazenamento de dados e por um processador, cuja função é processar os dados recebidos, determinando o que deve ser feito com uma determinada informação; iii) Uma unidade de sensoriamento composta por um Transdutor para retransmitir um sinal recebido, ou seja, o sinal (variável ambiental) que está sendo medido (umidade e temperatura) é retransmitido ao conversor Analógico Digital (AD), este, por sua vez, converte o sinal Analógico recebido do Transdutor em sinal Digital antes de enviar à unidade de processamento; iv) Uma unidade de energia que é composta por uma pequena bateria.

Figura 1: Arquitetura básica de um sensor wireless



Fonte: Adaptado de (AKYILDIZ et al., 2002)

Também podem ser observadas na Figura 1 outras unidades opcionais, como, unidade de localização para definir a posição geográfica do sensor, possibilitando a criação de algoritmos para fazer roteamento dinâmico na rede; unidade de movimentação, muito comum em redes não estáticas, tais como, flutuantes sobre oceanos ou anexada em corpos de animais, como controle de rebanho de gado; e por fim, uma unidade geradora de energia para realimentar a bateria, por exemplo, uso da energia solar para recarregar baterias.

2.1.2 Consumo de energia nos nodos

As atividades de um sensor no ponto de vista de consumo de energia podem ser resumidas em uma unidade fornecedora e quatro unidades consumidoras de energia, o sensor inicia com uma capacidade limitada de energia, ou seja, uma bateria. Em alguns casos existem sistemas de recarga de energia, por exemplo, energia solar. As unidades consumidoras de energia podem ser descritas respectivamente por ordem de maior consumo, módulo de rádio frequência composta por um processador que envia e recebe sinal de rádio, módulo de processamento composto por um microcontrolador responsável por realizar operações

relacionadas ao processamento de dado e/ou operações lógicas, unidade de memória e unidade de sensoriamento que é realizada pelo mesmo microcontrolador da unidade de processamento.

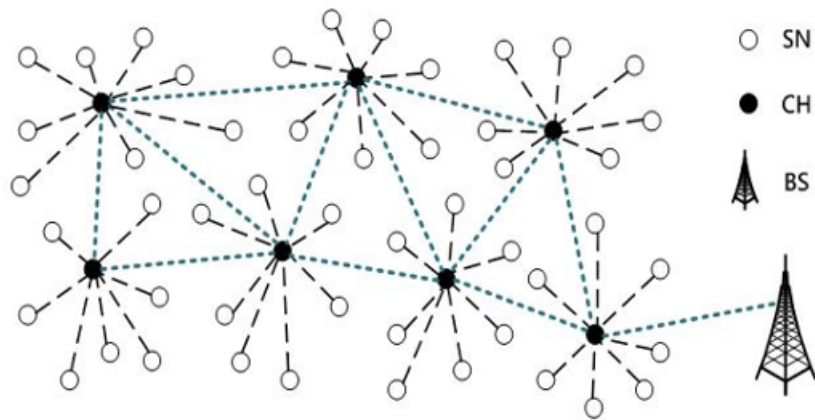
Os principais desafios relacionados ao consumo de energia estão relacionados ao fato que a fonte de energia no sensor é limitada às baterias que compõem o sistema e estas, por sua vez, é limitada ao tamanho, que não pode ser muito elevado, pois isto aumentaria a área do sensor e conseqüentemente tornando-o menos portátil. Deve-se lembrar que os sensores têm seus tamanhos reduzidos para dar maior mobilidade ao sistema com um baixo custo unitário. Portanto os esforços devem ser concentrados no sentido de otimizar as unidades de consumo de energia.

2.2 RSSF

Os nodos sensores de uma RSSF são geralmente dispersos no meio ao qual será feito o sensoriamento. Cada nodo tem a capacidade de coletar dados do ambiente ao qual encontra-se e, além disso, o mesmo deve ser capaz de receber e armazenar dados.

As conexões entre os nodos formam uma RSSF que, pode ser caracterizada pelo uso de uma grande quantidade de sensores capazes de comunicarem-se através do ar. Além disso, a implantação deste tipo de rede normalmente é de difícil acesso e, portanto, a distribuição dos nodos acaba sendo de forma aleatória. Desta forma, os protocolos de comunicação devem ser auto-organizáveis e levar em consideração a falta de informações sobre localização dos nodos sensores.

Figura 2: Representação gráfica de um modelo topológico de RSSF



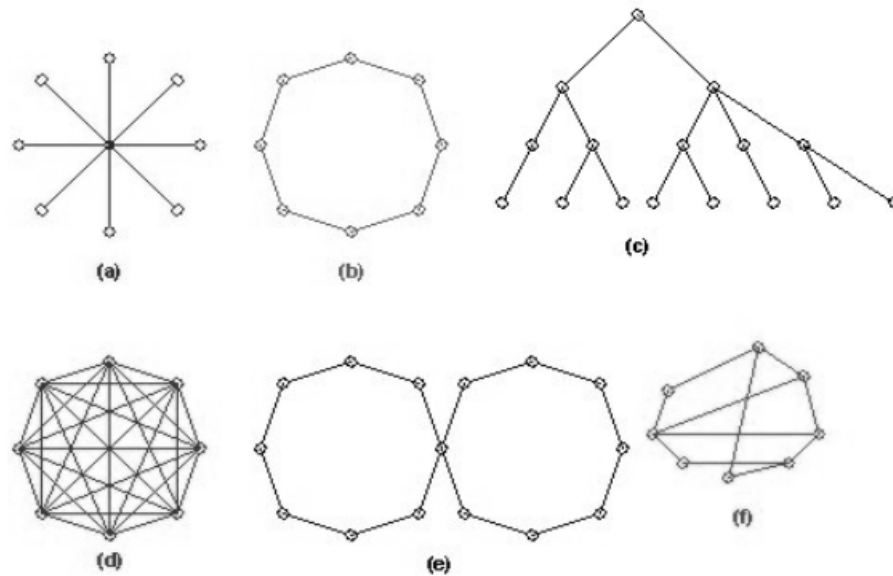
Fonte: http://ieeesmc.org/newsletters/back/2010.12/main_article3.html

A Figura 2 apresenta uma RSSF, que consiste em um conjunto de nodos sensores, do inglês *Sensor Node* (SN), distribuídos aleatoriamente, com o objetivo de monitorar as condições ambientais, tais como temperatura, vibrações, pressão, movimento, poluentes, etc. Esta figura apresenta um exemplo de topologia de como pode ser passado cooperativamente os dados monitorados através da rede até uma central. Além disso, é apresentado um conjunto de sensores que além de coletar informações do ambiente, são responsáveis por fazerem o roteamento da rede, através de um sensor central, do inglês *Cluster Head* (CH), o qual se encarrega de enviar para uma estação central, do inglês *Base Station* (BS).

2.2.1 Topologias de RSSF

Devido ao fato de que uma RSSF é composta por nodos muitas vezes inacessíveis e suscetíveis a falhas, sua manutenção é uma tarefa bastante complexa. Por este motivo as topologias para esses tipos de sistemas são normalmente um arranjo lógico topológico, que em muitos casos envolvem as topologias Estrela, Árvore e Malha, conforme Figura N. É muito comum encontrar redes em que um CH é formado por uma topologia em Estrela (conforme Figura 2), enquanto a comunicação entre os CH é formada por topologias em Árvore, Malha ou Barramento.

Figura 3: Topologias de RSSF

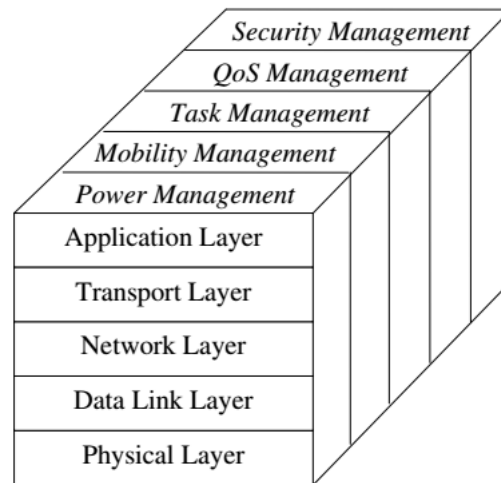


Na Figura 3 é apresentado algumas topologias normalmente utilizadas para RSSF: (a) estrela; (b) anel; (c) árvore; (d) malha; (e) anéis que se interceptam; (f) irregular.

2.2.2 Modelo de camadas em RSSF

A pilha de protocolos apresentada na Figura 4, tem como objetivo integrar dados com protocolos de redes. Cada uma das cinco camadas da pilha de protocolos (Aplicação, Rede, Enlace de Dados e Física) é composta por cinco planos: gerenciamento de consumo de energia, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de tarefas, gerenciamento de qualidade de serviços, e gerenciamento de segurança.

Figura 4: Modelo de camadas em RSSF



Fonte: (WANG; BALASINGHAM, 2010)

Camada Física

Na camada física encontram-se as técnicas de modulação do sinal, técnicas de transmissão e recepção de dados, que pode ser sinal de raio laser, sinais de micro-ondas, sinais infravermelho, sinais acústicos e etc. Nesta camada a transmissão e recepção dos bits são realizadas de forma simples e confiável, na maioria dos casos com controle de erros básicos.

Camada de Enlace

Esta camada tem a função de detectar e corrigir os erros de transmissão utilizando o método de correção de erros. Por se tratar da camada que contém o protocolo de acesso ao meio, alvo deste trabalho, a mesma será melhor e mais detalhadamente abordada na seção 3.5.

Camada de Rede

A camada de rede é responsável pela operação intra-rede, tem como objetivo encontrar e controlar o caminho mais eficiente para o transporte das informações, da origem ao destino. A principal função desta camada é o roteamento dos pacotes da origem ao destino. É nesta camada que se encontra os algoritmos de roteamento, que é uma parte do *software* responsável pela decisão da rota pelo qual os dados serão transmitidos.

Camada de Transporte

Esta camada é responsável pela transferência das informações de forma eficiente e confiável entre processos em execução nos dispositivos conectados à rede. Deve ser capaz de regular o fluxo de dados para garantir confiabilidade, ou seja, assegurar que as informações cheguem ao destino livre de erros.

Camada de Aplicação

A camada de aplicação é responsável por fornecer dados a serem transportados pela rede, estes dados são coletados do ambiente e manipulados pelo sistema que consta nesta camada, que podem ser referentes à temperatura, à pressão, à umidade ou qualquer variável que se deseja manipular.

2.3 CAMADA DE ENLACE

A camada de enlace de dados tem como principal função detectar e corrigir erros na transmissão de dados, particionando estes dados em *frames* e controlando o fluxo destes entre o transmissor e o receptor. Esta técnica é chamada de controle de acesso a meio (MAC). Abaixo serão listados os principais protocolos para o controle de acesso ao meio em RSSF.

2.3.1 Frequency Division Multiple Access (FDMA)

Neste método os sinais são divididos em frequências distintas e enviados ao destino, que deve estar preparado para receber sinais de várias frequências, entre um canal de frequência e outro existe uma faixa de frequência que não é utilizada, serve para que um sinal não interfira o outro, desta forma é possível enviar vários pacotes ao mesmo tempo, porém não é uma técnica muito recomendada em RSSF, pois para receber e transmitir em frequências diferentes deve ser criado circuitos adicionais no módulo de RF, aumentando a área do dispositivo.

2.3.2 Code Division Multiple Access (CDMA)

Trata-se de um método de acesso ao meio, onde cada nodo sensor tem um código distinto trabalhando de forma assíncrona, podendo acessar a rede a qualquer momento, para isso um receptor deve estar sempre ativo. Este método também faz uso de várias faixas de frequências, portanto enfrentando o mesmo problema do FDMA para RSSF, além disso, o fato de ter um receptor sempre ativo faz com que os nodos sensor tenham uma taxa elevada no consumo de energia.

2.3.3 Time Division Multiple Access (TDMA)

Neste método todos os nodos sensor devem transmitir em um período de tempo chamado de *frame*, cada nodo sensor deste *frame* tem um *time-slot* para transmitir, utiliza todo o canal, portanto não existe divisão de frequência, e consequentemente o tamanho do *hardware* é reduzido, se comparado com os protocolos anteriores. Trata-se de um dos métodos mais utilizados para RSSF e funciona da seguinte forma: um *cluster* é formado e neste *cluster* é eleito um nodo sensor que será chamado de CH. Todos os nodos deste *cluster* enviam seus dados para o nodo sensor eleito como CH. Como a cada *time-slot* só existe um sensor transmitindo, os demais podem entrar em um estado de dormência e assim, o consumo de energia é reduzido de forma significativa. Convém mencionar que este trabalho de mestrado consiste em fazer uma melhoria neste protocolo, tornando-o mais eficiente no que diz respeito ao consumo de energia, quando diante de alguns cenários específicos.

2.3.4 Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance (CSMA/CA)

Trata-se de um sistema de acesso múltiplo com detecção de colisões. Neste método, deve haver um acordo entre as duas estações, transmissor e receptor. Quando um nodo sensor deseja transmitir dados para um receptor, primeiramente ele envia um pacote de controle *Request To Send* (RTS). Quando o receptor recebe este pacote o mesmo responde com outro

pacote *Clear To Send* (CTS), informando ao transmissor que está pronto para receber. Já quando a estação transmissora recebe CTS, a mesma envia o pacote de dados. Os pacotes RTS e CTS são enviados para todos os sensores, porém aqueles que não são destino do pacote devem desligar seus RFs até o final da operação. Cada nodo sensor utiliza toda a faixa de frequência ao transmitir, portanto não precisa de hardware adicional tornando um protocolo bastante interessante para RSSF.

2.4 SIMULADORES DE RSSF

Considerando que uma RSSF pode ser composta por centenas ou milhares de nodos sensores, torna-se impraticável a validação e/ou avaliação de uma nova técnica através de sensores reais. Por esse motivo, simuladores tem contribuído para o desenvolvimento de novas técnicas. Nas próximas seções serão apresentados alguns simuladores existentes na literatura.

2.4.1 GloMoSim/QualNet

Trata-se de um ambiente de simulação para RSSF. O *GloMoSim* consegue simular eventos discretos e paralelos e foi desenvolvido pelo laboratório de computação paralela da *University of California*, Los Angeles. Inicialmente esse simulador oferecia funcionalidades básicas para simular redes sem fio. Em 2000 o *QualNet*, um derivado comercial de *GloMoSim*, foi lançado sob uma licença. Mais tarde, em Outubro de 2009, a versão 5.0 do *QualNet* é lançada incluindo uma nova biblioteca de rede de sensores para o padrão *ZigBee*, juntamente com uma série de melhorias, tais como: novas bibliotecas de segurança de rede, atualizações paralelas, novos modelos (por exemplo, bateria e energia). Além disso, uma nova interface gráfica foi adicionada (<http://web.scalable-networks.com/>, 2014).

2.4.2 OPNET Modeler wireless suite

Desenvolvido pela *OPNET Technologies Inc.*, este simulador fornece uma abordagem de modelagem orientada a objetos e um ambiente de modelagem hierárquica. Além disso, diferentes técnicas de propagação e modulação são oferecidas, bem como um *ZigBee* (802.15.4) com camada MAC. Módulos adicionais têm que ser personalizados ou desenvolvidos a partir do zero. As simulações de RSSF pode ser executada como um evento discreto, híbrido ou analítico, englobando o terreno, mobilidade e modelos de perda de caminho, (<http://www.opnet.com/>,2014) e (MARGHESCU et al., 2011).

2.4.3 OMNET++

Omnet++ não é um simulador, mas sim um *framework* que oferece uma estrutura para escrever simulações. É um sistema multiplataforma, podendo ser executado nos mais comuns sistemas operacionais, como o *Windows*, *Linux* e *Mac OS*. O conjunto de estrutura que permitem que o Omnet++ simule RSSFs é conhecido como *Castalia* (<http://castalia.research.nicta.com.au/index.php/en/>, 2014), (RASTEGARNIA; SOLOUK, 2011). Desenvolvido pela *National ICT* da Austrália em 2006, trata-se de um simulador de RSSF que suporta canais realistas e modelos de rádio, um elemento chave para a fase inicial de simulação RSSF. Além disso, o simulador fornece suporte para a definição de processos físicos versáteis (VARGA et al., 2001).

2.4.4 NS-2

É um simulador de eventos discreto orientado a objetos visando a pesquisa em rede. NS-2 é escrito em C++ e OTcl, uma versão orientada a objeto do Tcl. Atualmente, é o simulador de rede mais utilizado para pesquisas, consta de alguns recursos básicos para simular RSSF. O SensorSim (PARK; SAVVIDES; SRIVASTAVA, 2000).é um *framework* de simulação para RSSF que está incluído em NS-2. O mesmo fornece recursos adicionais para redes de

sensores, tais como modelos de canais do sensor, modelos de energia (bateria e rádio), pilhas de protocolos leves para micro sensores sem fio, geração de cenários e simulações híbridas (ABU-MAHFOUZ; HANCKE, 2011)

2.4.5 J-Sim

J-Sim é um ambiente de simulação baseado em componentes que se comunicavam uns com os outros através do envio e recebimento de dados através de suas portas. Modelos específicos de aplicação podem ser definidos por subclasses das classes especificadas do sistema de simulação de RSSF e adaptá-los para o comportamento desejado (<https://sites.google.com/site/jsimoficial/>, 2014), (SOBEIH *et al.*, 2005) e (SOBEIH *et al.*, 2006).

2.4.6 EmStar

EmStar é um ambiente para RSSF construídos a partir de dispositivos de classes Linux, chamado micro servidores. O EmStar consiste em ferramentas de simulação e emulação, que oferece diferentes modos de simulação: um modo de simulação pura, um modo de emulação, um modo real e um modo híbrido (ELSON *et al.*, 2003).

2.4.7 WiNeS

Desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Embarcados (GSE) da Faculdade de Informática da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), o WiNeS é um *framework* desenvolvido em Java especialmente construído para suportar as opções de rede personalizadas que, por sua vez, oferece simulação híbrida para nós virtuais e físicos, em um mesmo ambiente. As principais características deste simulador são: suporte a eventos discretos, eventos síncronos, eventos assíncronos, cálculo da distância máxima entre dispositivos, regras para avaliar a

conectividade dos nós, além de ser possível trabalhar com espaço geográfico 2D e 3D (BOHRER et al., 2013).

2.5 SISTEMAS CRÍTICOS

Sistemas críticos, neste contexto, estarão relacionados ao comportamento, normalmente natural, de alteração das variáveis ambientais monitoradas, de tal forma que causem perdas, comumente conhecidas como desastres naturais. A seguir, são citados alguns exemplos de possíveis aplicações para RSSFs:

- Deslizamento de barreiras é um fenômeno comum em áreas de relevo acidentado. Ocorre principalmente em terrenos onde houve a retirada da cobertura vegetal, que é responsável pela consistência do solo e que impede o escoamento das águas. Durante os períodos de chuva, é frequentemente noticiada a ocorrência de enchentes e deslizamentos em áreas marginalizadas, produzindo prejuízos e mortes em diversas regiões;
- Abalo sísmico ou terremoto é um tremor da superfície terrestre produzido por forças naturais situadas no interior da crosta terrestre. São causados pelo choque entre placas rochosas abaixo do solo. Outros fatores associados a este fenômeno são deslocamentos de gases como o metano e as atividades vulcânicas. Uma das maiores atividades vulcânicas que se tem registro é o Vesúvio que se tornou mundialmente famoso por sua erupção de 79 d.C que destruiu as cidades de Herculano e Pompéia;
- Incêndios florestais, é comum a ocorrência de queimadas e incêndios florestais, sobretudo por fatores climáticos e pelo uso indiscriminado do fogo, causando sérios prejuízos à fauna e flora, reduzindo a cobertura vegetal, diminuindo a fertilidade do solo e comprometendo a qualidade do ar e, conseqüentemente, a saúde humana, provocando vários tipos de doenças, principalmente respiratórias.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS AO MODELO ENERGÉTICO

A Figura 1 apresenta uma pequena fração da quantidade de componentes que compõe um nodo sensor e cada componente consome uma determinada quantidade de energia. Entretanto, ao realizar uma simulação torna-se muito exaustivo representar todos os componentes. Por esse motivo, ao criar um modelo, é preciso representar as características do *hardware* o mais próximo possível da realidade. Obviamente que muitos componentes têm um consumo de energia insignificante e por esse motivo acabam não sendo incluídos no modelo energético e conseqüentemente, apresentando erro de precisão.

(WANG; YANG, 2007) propuseram um modelo geral para medir o consumo de energia dos dispositivos de RSSF, baseadas em sua arquitetura real. Basearam-se no consumo de energia com desempenho médio dos componentes do *hardware* real para implementar um modelo energético de comunicação de subsistema realista, que reflete o consumo de energia em vários estados de funcionamentos e durante as transições entre os estados dos dispositivos.

Em (KELLNER et al., 2008) é apresentado um modelo energético teórico baseado em autômatos finitos, podendo ser usado para contabilização do consumo de energia *on-line*. Também apresentam um modelo teórico que faz uso de um dispositivo de gerenciamento do nodo sensor. Por se tratar de um modelo para contabilização *on-line* do seu consumo energético, é possível obter uma visão mais detalhada e mais precisa sobre o consumo de energia. Em contra partida, os autores utilizam apenas um modelo de sensor, ZigBee CC2420.

(HALGAMUGE et al., 2009) demonstraram a importância da utilização de um modelo de energia abrangente comparando-o com outros modelos existentes em termos de tempo de vida de um nó sensor. Os autores usaram seu modelo para avaliar o consumo de energia e o tempo de vida para uma rede de sensores com configuração fixa. Mostram que os modelos energéticos existentes superestimam a expectativa de vida de um nodo sensor de 30-58

Em (CHEN et al., 2009), os autores apresentam um modelo de energia genérico dos componentes do núcleo do sensor para o simulador OMNET++. O modelo tem como vantagem a possibilidade de avaliar o desempenho energético em qualquer tipo de nodo sensor.

No trabalho (ZHOU et al., 2011) os autores investigam os principais estados de funcionamento e a transição entre tais estados, em diferentes nodos sensores. No final apresentam um conjunto de modelos energéticos dos principais componentes consumidores de energia, que

envolve o módulo de processamento, de sensoriamento e de rádio frequência. O trabalho revela também uma correlação de energia entre os componentes dos nodos, desta forma estabelece um modelo energético com base em um mecanismo de disparo de evento.

Este trabalho procura aproximar-se de um caso genérico a partir de um sensor específico para o simulador WiNeS. Ao analisar um nodo sensor da *Texas Instruments* com rádio frequência CC2500 e um microcontrolador MSP430, foi possível modelar matematicamente o consumo de energia do mesmo e a partir desses dados especificar um conjunto de máquinas de estados que modelam o consumo de energia do nodo. Note que a partir desse estudo de caso, foi possível estender o modelo para um caso genérico.

2.7 TRABALHOS RELACIONADOS AO TDMA

(HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) realizam uma análise detalhada através da implementação do LEACH, que consiste em: I) auto-configuração para formação de *cluster*, de forma randômica e adaptativa; II) controle na transferência de dados de forma centralizada; III) Baixo consumo de energia no controle de acesso ao meio; IV) agregação ou compactação de dados antes de transmitir de uma estação central do *cluster* ao *link*. Esta última técnica é que tem maior contribuição, pois reduzindo a transmissão de redundância de dados reduz a dissipação de potência.

(KANZAKI et al., 2003) concentram-se em um TDMA com atribuição de *slot* dinamicamente, com a finalidade de melhorar a utilização do canal. Sua técnica controla o crescimento excessivo de *slots* não atribuído, através da alteração do tamanho do *frame* de forma dinâmica. Este protocolo prevê a transmissão de pacotes sem colisões entre nós com tamanhos de *frames* diferentes.

(HOESEL et al., 2004) propuseram um protocolo de acesso ao meio chamado EMACs totalmente distribuído, apresenta um TDMA auto-organizável capaz de prolongar a vida útil da rede, para alguns cenários. Os autores compararam com o protocolo SMAC (YE; HEIDEMANN; ESTRIN, 2004) na configuração de rede com múltiplos saltos, onde a leitura do sensor é transportada para um nó específico usando o protocolo de roteamento de origem dinâmica.

(CHO et al., 2005) propuseram um novo protocolo MAC chamado de DEE-MAC, que reduz o consumo de energia fazendo os nós ociosos dormirem para reduzir a escuta ociosa, para isto faz uso de sincronização com o *cluster-head*.

(LEE; DATTA; CARDELL-OLIVER, 2006) propuseram um protocolo chamado FlexiMAC, que é uma estrutura sincronizada e com solto de *slot*. Neste protocolo os nós podem reivindicar ou remover um *slot* com base nas informações de suas tabelas de pesquisa, sem a troca de informações com outros nós na rede. Os nós podem entrar ou sair da rede a qualquer momento.

(XIE; WANG, 2008) propuseram EC-TDMA, que é um protocolo de comunicação MAC *intra-cluster* para RSSFs. A proposta é mudar dinamicamente o tamanho do *frame* do TDMA, de acordo com o número de nós e da carga de dados que trafega no *cluster*.

(WANG et al., 2010) desenvolveram D-TDMA para o rastreamento de alvo baseado em DCTC que serve para detectar e rastrear um alvo móvel em RSSF. Esta técnica consiste em fazer uma varredura em uma grande região através de um alvo (uma pequena região) conforme o alvo vai passando nós da rede entram na configuração da árvore enquanto outros vão saindo da árvore em cada árvore ativa as folhas enviam seus dados em direção à raiz através de um TDMA.

(MA et al., 2009) propuseram um sistema baseado em TDMA com *Sleep Scheduling* livre de interferência, que consiste em atribuir aos sensores intervalos de tempo consecutivo a fim de reduzir a frequência de transição de estados, pois a transição do estado *Sleep* ao estado *Active* tem um custo considerável no consumo de energia.

Em (ODEY; LI, 2012) propuseram um modelo de consumo de energia sobre os parâmetros de projeto de recepção e transmissão dos dados, que influencia significativamente na dissipação de potência. O sistema baseia-se em autômatos finitos simples e revela o relacionamento entre o consumo de energia total e os parâmetros de energia importantes do módulo de RF.

(SAYADI; MAHFOUDH; LAOUITI, 2012) propuseram um consumo eficiente de energia em TDMA, que é dinâmico quanto ao tamanho do *frame*, nomeado de S-OSTR. Os autores discutem um período ativo através do tamanho do *frame* dinâmico, que é construído *slot* por *slot* através dos nós que chegam na rede.

(BHATIA; HANSDAH, 2014) propuseram um esquema novo para TDMA *Sleep Scheduling* em RSSF, que pode gerar uma agenda compacta semelhante ao algoritmo de escalonamento

estático, enquanto o seu desempenho em tempo de execução pode ser combinado com os dos algoritmos de programação dinâmica. Além disso, o algoritmo proposto tem a capacidade de manter um *trade-off* entre o comprimento da agenda e o tempo necessário para gerar o cronograma.

Tabela 1: Resumo das características dos trabalhos relacionados

Trabalhos	Ano	Eficiência energética	CH	Time-slot	Frame-size	Suporte a sistemas críticos
HEINZELMAN	2000	Alta	Sim	Fixo	Fixo	Não
Kanzaki	2003	Baixa	Não	Fixo	Flexível	Não
Van Hoesel	2004	Alta	Não	Flexível	Fixo	Não
Cho	2005	Alta	Sim	Fixo	Fixo	Não
Lee	2006	Alta	Não	Fixo	Flexível	Não
Xie	2008	Alta	Sim	Flexível	Flexível	Sim
Junchao	2009	Alta	Não	Fixo	Fixo	Não
Wang	2010	Baixa	Não	Flexível	Flexível	Não
Sayadi	2012	Alta	Não	Fixo	Flexível	Não
Bhatia	2014	Alta	Não	Fixo	Fixo	Não
Trabalho Proposto	-	Alta	Sim	Flexível	Flexível	Sim

Todos os trabalhos apresentados na Tabela 1 têm como objetivo reduzir o consumo de energia usando protocolos baseado em TDMA com *Sleep Scheduling*. A técnica apresentada em (KANZAKI et al., 2003), apesar de ter um *frame-size* flexível não é adequada para sistemas críticos, pois o aumento do *frame* é dado através da inclusão de novos dispositivos sem fio na rede, ou seja, inclusão de novos *time-slot* para dar suporte ao novo dispositivo.

(WANG et al., 2010) implementou um sistema de rastreamento de um determinado alvo na rede, ou seja, não se aplica em sistemas críticos.

O trabalho de (HOESEL et al., 2004), apesar de sofrer alteração quanto ao tamanho do *time-slot*, o tamanho do *frame* é sempre constante, tornando assim impossível para sistemas críticos. De mesma forma os trabalhos (MA et al., 2009), (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) e (BHATIA; HANSDAH, 2014) também não são ideais para sistemas críticos devido ao fato que os *fremes* são de tamanho fixo.

O trabalho apresentado em (LEE; DATTA; CARDELL-OLIVER, 2006), também não é adequado para tais sistemas devido à sua topologia de transporte de dados, que é organizado em uma estrutura de árvore de forma que cada *time-slot* um pacote de dados é propagado

a um nível superior da árvore em direção a BS, que é a base da árvore, assim, nodos que representam as folhas da árvore tem um alto atraso para chegar ao BS.

O trabalho (SAYADI; MAHFOUDH; LAOUITI, 2012) também apresenta um problema topologia porque é um sistema de saltos múltiplos para transportar os dados a estação base, sendo, portanto, inadequados para sistemas críticos.

Em (CHO et al., 2005) assume-se que o sistema tem uma frequência muito baixa de tráfego de dados, tipicamente de minutos ou horas, portanto não serve para sistemas críticos.

O trabalho em (XIE; WANG, 2008) apresenta maior flexibilidade com tamanho *frame*, o qual é baseado no número de sensores e a quantidade de dados de tráfego, tornando-o excelente para sistemas críticos, no entanto, o uso de previsões do comportamento ambiental para determinar o tamanho do *time-slot* no futuro, torna-se arriscado seu uso em sistemas críticos, porém pode obter uma resposta mais rápida.

Neste trabalho é proposta uma técnica que objetiva reduzir o consumo de energia quando as variáveis ambientais, que estão sendo monitoradas, se encontram numa situação estável, ou seja, com valores que não representa risco ao ambiente. Desta forma, esta técnica torna-se adequada para sistemas críticos, pois reduz o consumo de energia quando não existe necessidade de monitoramento do ambiente, mas quando o sistema se torna crítico ela utiliza a energia economizada para acelerar o monitoramento. Este controle é feito através do aumento ou redução do *time-slot* do protocolo proposto, que foi baseado TDMA *Sleep Scheduling*

3 PROPOSTA

Este Capítulo tem por objetivo apresentar as especificações e técnicas de implementação do novo algoritmo de acesso ao meio baseado em TDMA, juntamente com as especificações do modelo energético implementado para quantificar a eficiência do novo algoritmo proposto.

3.1 ESPECIFICAÇÃO DO MODELO ENERGÉTICO

Este capítulo apresenta a especificação e implementação de um modelo energético para uma classe de nodos sensores. O modelo proposto tem por objetivo quantificar o consumo de energia dos componentes que mais consomem energia em um nodo sensor *wireless*, levando-se em consideração o comportamento do mesmo quando adotando o protocolo de acesso ao meio baseado em TDMA, desenvolvido neste trabalho.

Desta forma, este modelo tem como finalidade estimar o consumo de energia dos principais componentes de um novo sensor, visto que as medições reais de todos os componentes de um nodo sensor é considerada impraticável.

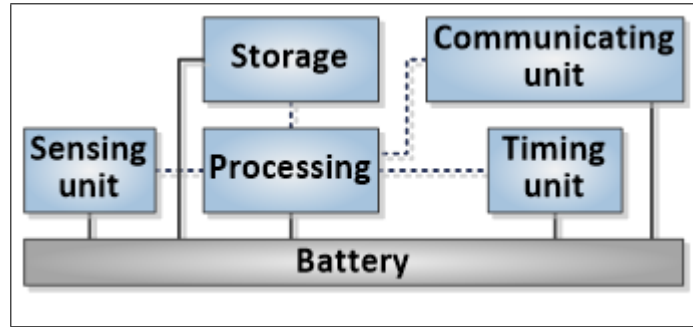
Portanto, quanto mais detalhista for o modelo, melhor será a aproximação de um caso real, ao passo que quanto mais generalista for o modelo mais simples será sua implementação e compreensão. Assim, levando-se em consideração esses dois fatores, uma análise de custo-benefício entre eles deve ser considerada.

Os principais componentes relevantes quanto ao consumo de energia de um sensor *wireless* são formados pelas seguintes unidades: processamento, sensoriamento, armazenamento (memória) e comunicação por rádio frequência, a qual é composta por um módulo de transmissão e um módulo de recepção de dados, conforme já apresentado no capítulo anterior.

A Figura 5 apresenta as principais unidades consumidoras de energia de um sensor, conforme descrito a seguir: I) *Sensing Unit*, unidade responsável pela coleta de variáveis ambientais; II) *Processing*, unidade responsável pelo processamento de todas as informações sobre o sensor; III) *Storage*, unidade responsável por armazenar todas as informações sobre o sensor, isso inclui as variáveis coletadas do ambiente e informações sobre rotas; IV) *Timing Unit*, utilizado para ativar a unidade de processos, ou seja, é a unidade que acorda o sistema;

V) *Communicating Unit*, unidade responsável pela transmissão e recepção de dados de outros sensores.

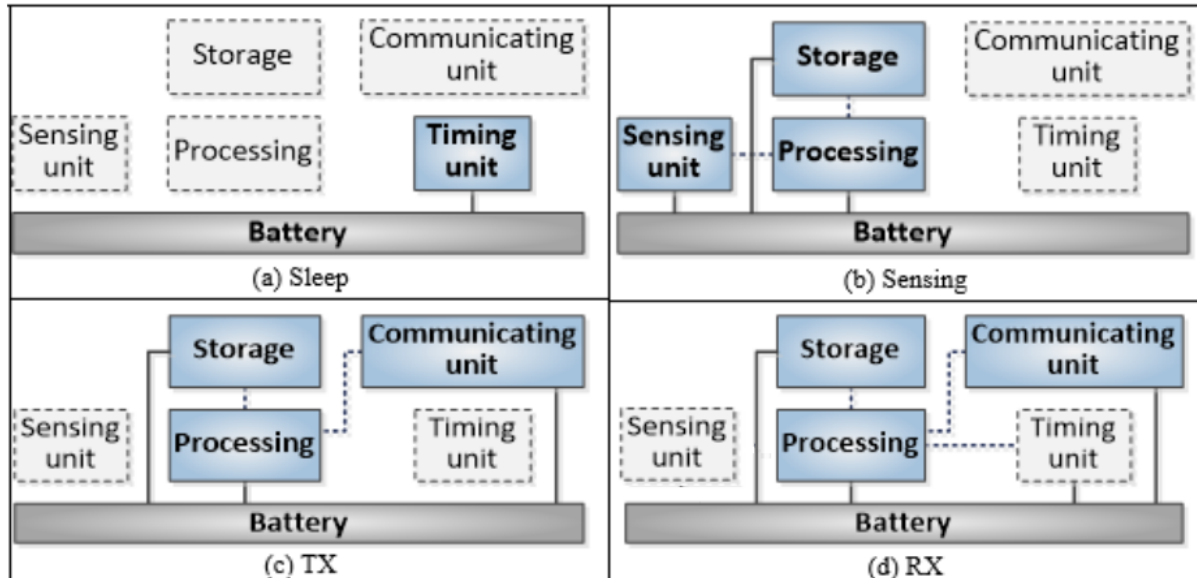
Figura 5: Unidades consumidoras de energia



Inicialmente o sistema encontra-se em um estado de consumo mínimo de energia, como mostrado na Figura 6a (*Sleep*). Nesse estado, a única unidade ativa é *Timing Unit*, que é usado para reativar o sistema. A Figura 6b (*Sensing*) mostra a unidade de sensoriamento ativa, ou seja, nesse estado, o sistema coleta variáveis do ambiente e armazena em um *buffer* de memória (*Storage*). Figura 6c (TX) indica que *Communicating Unit* está ativada. Nesse processo os dados são retirados do módulo de armazenamento e enviados ao próximo nodo que, pode ser o destino final ou apenas um nodo que pertence ao caminho na rede.

Na Figura 6d, (RX) representa o nodo sensor que recebe dados da rede. Esses dados podem estar relacionados a sincronização dos relógios, variáveis oriundas de outro nodo, relacionados a configuração da rede, etc. Observa-se que, com exceção do estado *Sleep*, a unidade de processamento está sempre ativa.

Figura 6: Processo de consumo de energia



Um possível cenário de operação neste modelo, para um protocolo de acesso ao meio baseado em TDMA é: o sensor inicialmente está dormindo (*Sleep*) e acorda após um determinado tempo, coleta as variáveis do ambiente e volta a dormir. Esse processo é repetido até que seja solicitado uma transmissão ou recepção de dados. Em seguida, os dados são transmitidos (TX) para um *Cluster-Header* (CH). Ao término da transmissão, o sensor volta a dormir e a coletar variáveis do ambiente, com a mesma frequência utilizada anteriormente. No final do *frame*, uma nova agenda referente aos nodos que se encontram no estado RX é transmitida do CH para os outros nodos sensores, e o processo se repete novamente.

A metodologia utilizada para obter esse modelo energético será concebida através de um conjunto de modelos de energia, especificamente para o sensor ZigBee CC2500 dotado de um microcontrolador MSP430, de propriedade da *Texas Instruments*. Por fim, o modelo específico será estendido para um modelo genérico, desta forma ampliando-o para um conjunto mais elevado de sensores *wireless*.

3.1.1 Modelo de energia para o módulo de sensoriamento (ME_S)

O sensoriamento consiste em capturar as variáveis do ambiente de forma analógica e converter este sinal em formato digital. Para esta conversão é usado um conversor analógico

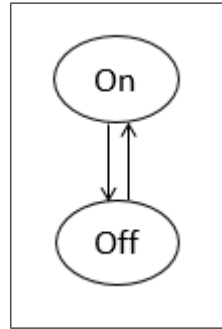
digital (A/D) e controlado por um MCU, e o consumo de potência dependerá deste MCU e do tipo de variável que será coletada. Todavia para dar mais clareza neste trabalho, será utilizado um sensor composto pelo MCU MSP430 para gerenciar a coleta da temperatura de uma determinada região. O consumo de energia no sensoriamento pode ser resumido em uma máquina de estado, conforme Figura 7, e seu cálculo pode ser dado pela Equação 1

$$E_{Sensor} = \sum_1^N (E_{on-off} + E_{off-on} + E_{sensor-run}) \quad (1)$$

Onde E_{on-off} é o consume de energia gasto durante o término da operação, E_{off-on} é o consumo de energia gasta durante o início da operação, $E_{sensor-run}$ é o consumo de energia gasto durante o estado de funcionamento e N é o número de vezes em que a coleta é feita. A Equação 2 pode ser obtida através da substituição do último termo da Equação 1 pelo produto entre, tensão T_S , corrente I_S e tempo gasto na operação T_S .

$$E_{Sensor} = \sum_1^N (E_{on-off} + E_{off-on} + U_S I_S T_S) \quad (2)$$

Figura 7: Modelo energético simplificado da unidade de sensoriamento



Dessa forma, se nos concentrarmos apenas no MSP430 coletando temperatura, teremos valores fixos nos estados e nas transições entre os nodos. Esses valores são determinados pelo fabricante, conforme (INSTRUMENTS, 2012), (MORALES; SHIVERS, 2007) e (MOSCHITTA; NERI, 2014). Considerando a tensão do MCU, $U=3V$, chega-se a equação

$$E_{Sensor} = \sum_1^N (0,16mA * 0,13ms * 3 + 0,16mA * 0,13ms * 3 + 0,16mA * 0,03ms * 3)$$

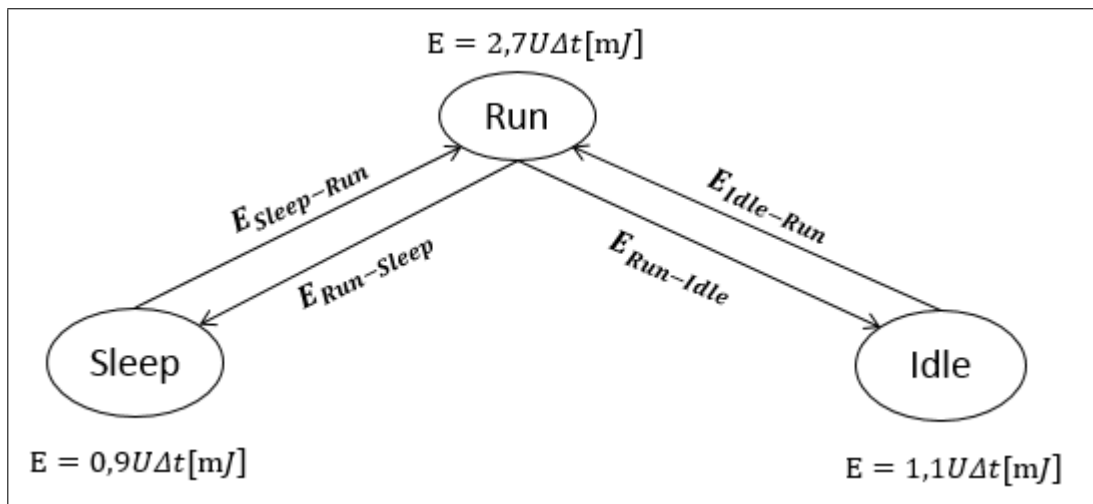
$$E_{Sensor} = \sum_1^N (0,1392\mu J) = N(0,1392\mu J) \quad (3)$$

Portanto cada leitura de temperatura gasta $0,1392\mu J$ de energia.

3.1.2 Modelo de energia para o módulo de processamento MCU (ME_MCU)

O consumo de energia deste módulo pode ser dado pelo estado de dormiência (*Sleep*), estado de processamento (*Run*) e estado de aguardo (*Idle*), e seu funcionamento pode ser visto através da máquina de estado da Figura 8.

Figura 8: Máquina de estado da unidade de processamento com valores equivalente ao MSP430



De acordo com a Figura 8, existem dois caminhos possíveis para sair do estado *Run* e retornar ao mesmo, *RunSleepRun* e *RunIdleRun*. Considerando que o estado *Run* é o que realiza as operações de comunicação entre as unidades do sensor, além de outras operações, conclui-se que a permanência neste estado é obrigatória em algum momento, porém por se tratar de um estado que tem o maior consumo de energia, é conveniente que a permanência neste estado seja a menor possível. Portanto quando não está em operação deve-se optar pelo estado *Idle* ou *Sleep*. Esta decisão é tomada de acordo com a dissipação de energia durante a transição entre os estados somado com o gasto durante a permanência no estado destino. Este consumo de energia pode ser dado por:

- I) *RunSleepRun*, normalmente esta é a melhor opção, pois se sabe que o estado *Sleep* tem menor dissipação de energia que o estado *Idle*, entretanto em alguns *MCUs* o gasto

de energia $E_{Sleep-Run} + E_{Run-Sleep}$ pode ser elevado, de tal forma, que dependerá de quanto tempo o sistema permanecerá neste estado;

- II) *RunIdleRun*, optar-se-á por este caminho sempre que o tempo de processo do *MCU* for muito curto, ou seja, $E_{Run-Idle} + E_{Idle-Run} + E_{Idle} < E_{Sleep-Run} + E_{Run-Sleep} + E_{Sleep}$.

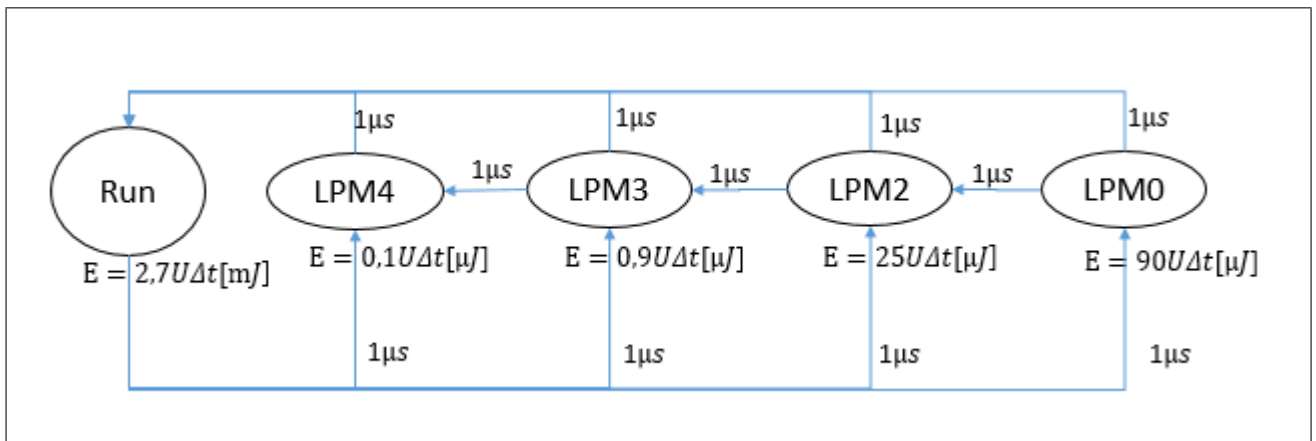
Conforme (ZHOU et al., 2011), o consumo de energia na transição entre dois estados pode ser dado por:

$$E = \frac{t_{i-f}(P_i + P_f)}{2} \quad (4)$$

Onde t_{i-f} representa o tempo de transição entre dois estados e P_i e P_f representam respectivamente potência consumida no estado origem e potência consumida no estado destino.

Entretanto, para o MSP430 a troca de estado tem um tempo aproximado de 1, conforme pode ser visto em (INSTRUMENTS, 2012), (MORALES; SHIVERS, 2007) e (MOSCHITTA; NERI, 2014) Além disso, a corrente no estado *Sleep*, *Low Power Model* (LPM), é extremamente baixa ($90\mu\text{A}$ para LPM0, $25\mu\text{A}$ para LPM2, $0,9\mu\text{A}$ para LPM3 e $0,1\mu\text{A}$ para LPM4). Portanto, neste modelo, o processador ou está trabalhando ou está operando em algum modo de baixo consumo de energia. Dessa forma, neste MCU a unidade de processamento implementada segue a máquina de estados apresentada na Figura 9. A Tabela 2 apresenta o resumo da dissipação de energia para unidade em questão.

Figura 9: Máquina de estados para o MCU MSP430



Fonte: (MOSCHITTA; NERI, 2014)

Aplicando à Equação 4 os valores da Tabela 2 e considerando que LPM0 é o estado *Idle* (pior caso) e LPM4 o estado *Sleep*, observa-se que a permanência no estado *Idle* não

Tabela 2: Equações do consumo de potência da unidade de processamento, versão resumida (MSP430 com $U=3V$)

Estado	Corrente	$P = UI \Rightarrow E = P\Delta t = UI\Delta t$
MCU sleep (MSP430 em modo LPM4)	$0,1\mu A$	$E=0,3\Delta t[\mu J]$
MCU sleep (MSP430 em modo LPM3)	$0,9\mu A$	$E=2,7\Delta t[\mu J]$
MCU Sleep (MSP430 em modo LPM2)	$25\mu A$	$E=75\Delta t[\mu J]$
MCU Sleep (MSP430 em modo LPM0)	$90\mu A$	$E=270\Delta t[\mu J]$
MCU Run	$2,7mA$	$E=8,1\Delta t[mJ]$

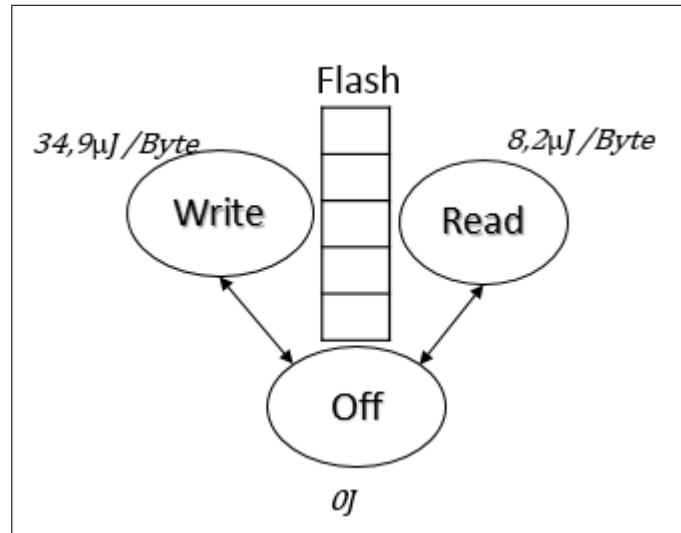
compensa. Desta forma, para este modelo será utilizado apenas o estado *Sleep* e o Estado *Run*.

3.1.3 Modelo de energia para o módulo de memória (ME_M)

O principal objetivo do módulo de memória é armazenar os dados coletados do ambiente pela unidade de sensoriamento ou informações oriundas de outros nodos sensores. Esses dados são armazenados por um determinado período de tempo, para que posteriormente possam ser lidos e processados pelo microcontrolador, ou até mesmo enviados para a rede através do módulo de RF. A máquina de estado da Figura 10 apresenta uma abstração do funcionamento dessa unidade, onde se tem três estados: *Read*, para fazer a leitura na memória; *Write*, para fazer a escrita na memória; *Off*, para indicar que não está sendo feita leitura nem escrita na memória.

O módulo de memória utilizado no CC2500 com MSP430 é a memória *Flash*, conforme (INSTRUMENTS, 2012). O consumo de energia para este sistema foi medido por (AMIRI, 2010), que obteve os valores para *Read* e para *Write* respectivamente $8,2\mu J/Byte$ e $34,9\mu J/Byte$, já incluso o consumo na transição entre os estados.

Figura 10: Máquina de estados para leitura e escrita na memória



3.1.4 Modelo de energia para o módulo de RF (ME_RF)

O módulo de RF é responsável pela recepção e transmissão de dados, e seu consumo de energia pode ser dado pelos estados *Sleep*, *Rx*, *Tx* e *Idle*.

O funcionamento deste módulo pode ser visto através da máquina de estado representada pela Figura 11. Além disso, a Tabela 3 apresenta um resumo do consumo de potência para cada estado, bem como o gasto de energia durante a transição entre eles. Nesta tabela, pode-se observar que o estado *Sleep* consome pouca energia. Essa situação comprova que na ausência de transmissão ou recepção, o estado de *Sleep* representa a melhor opção para reduzir o consumo de energia. Entretanto, ao observar a dissipação de potência na transição deste estado para os estados *Rx* ou *Tx*, chega-se à conclusão que para obter uma economia neste estado o consumo gasto na reativação deve ser menor que o consumo de permanência no estado, ou seja, retornar ao estado *Rx* ou *Tx*.

Dado que o consumo de energia durante a transição entre os estados é constante para um mesmo modelo de sensor, a decisão entre os estados *Sleep* e *Idle* dependerá do tempo de permanência nesses estados.

A seguir alguns termos considerados importantes para o entendimento da Tabela 3:

Crystal Oscillator (XOSC) startup é o oscilador CC2500 usado como fonte geradora de *clock* do sistema.

Ripple counter timeout, indica quantas vezes um contador de *ripple* deve expirar depois de uma rotina de inicialização XOSC.

PLL calibration é um sintetizador de frequência que ocorre após uma mudança do estado *Idle* para um estado Rx ou Tx.

Rx é o módulo de recepção de dados, mesmo em sensores que só transmitem este módulo é necessário para uma transmissão bem-sucedida, pois pode ser utilizado para fazer uma avaliação do canal.

Tx é o módulo que serve para transmitir dados a outros nodos sensor da rede.

Idle é o estado onde apenas o regulador de tensão e o cristal gerador de *clock* ficam em funcionamento.

Sleep, neste estado o regulador de tensão também fica desligado, a habilitação do módulo de escuta de RF *Wake On Radio* (WOR) é opcional. WOR periodicamente acorda o sistema para ouvir se existem pacotes chegando, não necessita do MCU.

Rx Pulling automático não se trata de um estado ou da transição de um estado, mas sim de um consumo adicional que pode ser configurado para que Rx fique dando *polling*, ou seja, se estiver no estado *Sleep* com WOR habilitado é possível avisar que existem dados a ser recebido, inclusive pode ser utilizado para acordar o microcontrolador. *Polling* a cada segundo tem um consumo de $8.1\mu\text{A}$ e *polling* a cada 15 segundo tem um custo de $1.4\mu\text{A}$.

O intervalo de tempo de Tx ou Rx é diretamente proporcional a carga de dados que esta sendo transmitida e inversamente proporcional a frequência de transmissão de dados da rede. Considerando que cada pacote transmitido ou recebido contem, além das variáveis "sensoriadas", um cabeçalho com dados relacionados as configurações da rede, desta forma, para os estados Tx e Rx a variação do tempo pode ser obtida conforme Equação 5.

$$\Delta t = \frac{8(O_{MAC} + n)}{r} \quad (5)$$

Onde:

$O_{MAC} = 31\text{bytes}$, tamanho do *frame* (*MAC header*, *Cyclic Redundancy Check*, endereço origem, endereço destino e etc);

r =taxa de transmissão de *bits*, que para frequência de 2.4GHz fica 250Kbps;

n =Número de *bytes* transmitidos

Como a frequência r é dada por *kilo bit* por segundo, a parte superior da fração precisa ser multiplicada por 8, que corresponde a um *byte*.

Tabela 3: Valores de consumo de energia na unidade de RF

ME_Radio (CC2500)				
	Descrição	Corrente/Tempo	$P = UI = E = P\Delta t = UI\Delta t$	
TROCA DE ESTADO	Rx para Tx	7,5mA/0,0096ms	$E = 0,072U\mu J$	
	Tx para Rx	7,5mA/0,0215ms	$E = 0,1575U\mu J$	
	Idle para Tx (calibration)	7,492mA/0,809ms	$E = 0,1575U\mu J$	
	Idle para Rx (calibration)	7,492mA/0,809ms	$E = 6,061U\mu J$	
	Idle para Tx (no-calibration)	7,492mA/0,0884ms	$E = 0,662U\mu J$	
	Idle para Rx (no-calibration)	7,492mA/0,0884ms	$E = 0,662U\mu J$	
	Rx para Idle (calibration)	7,4mA/0,721ms	$E = 5,3354U\mu J$	
	Tx para Idle (calibration)	7,4mA/0,721ms	$E = 5,3354U\mu J$	
	Rx para Idle (no-calibration)	1,5mA/0,0001ms	$E = 0,00015U\mu J$	
	Tx para Idle (no-calibration)	1,5mA/0,0001ms	$E = 0,00015U\mu J$	
	Tx para Sleep	7,5mA/0,721ms	$E = 5,4075U\mu J$	
	Rx para Sleep	7,5mA/0,721ms	$E = 5,4075U\mu J$	
	Sleep para Tx/Rx	XOSC startup	2,7mA/0,3ms	$E = 0,8100U\mu J$
		Ripple counter	1,75mA/0,15ms3	$E = 0,2625U\mu J$
PLL calibration		7,5mA/0,809ms3	$E = 6,0675U\mu J$	
Total		11,95mA/1,259ms3	$E = 7,1400U\mu J$	
ESTADOS	Rx	13,3mA	$E = 13,3U\Delta tmJ$	
	Tx (-12dBm)	11,1mA	$E = 11,1U\Delta tmJ$	
	Tx (-6dBm)	15mA	$E = 15U\Delta tmJ$	
	Tx (0dBm)	21,2mA	$E = 21,2U\Delta tmJ$	
	Tx (+1dBm)	21,5mA	$E = 21,5U\Delta tmJ$	
	Idle	1500A	$E = 1500U\Delta t\mu J$	
	Sleep	0,4A	$E = 0,4U\Delta t\mu J$	
	Sleep (WOR habilitado)	0,9A	$E = 0,9U\Delta t\mu J$	

Fonte: (INSTRUMENTS, 2008)

O consumo de energia na transmissão do sinal está diretamente relacionado com a distância entre o sensor que transmite e o que recebe os dados, além disso, o ambiente ao qual a rede está inserida influencia significativamente no alcance que o sinal pode atingir, a Equação 6 tem como objetivo determinar a distância do raio de alcance do sinal transmitido. Com a Equação 7 é possível calcular a potência do sinal a uma distância d , considerando caminho livre. Com as informações fornecidas pelas duas equações é possível determinar qual

a melhor potência de transmissão para alcançar um sensor a uma determinada distância, com uma boa qualidade de sinal.

$$R = d = 10^{\frac{P_0 - F_m - F_r - 10N \text{Log}_{10}(f) + 30N - 32.44}{X}} \quad (6)$$

$$P_d = P_0 - 20 \text{Log}_{10}(f) - 20 \text{Log}_{10}(d) + 27.56 \quad (7)$$

Onde F_m , *Fade margin*, é a diferença entre os níveis de energia entre o sinal atual que chegou no receptor e o sinal mínimo necessário para recepção, N representa a perda do sinal devido a impermeabilidade do meio em que ocorre a transmissão. A Tabela 4 apresenta alguns ambientes com seus respectivos valores de N , P_0 corresponde à potência do sinal (em *dBm*) na antena do sensor (potência de transmissão mais ganho da antena), f é a frequência com que o sinal é transmitido no meio, P_r é a sensibilidade na recepção do sinal em *dBm* e P_d é a potência do sinal em uma distância d da antena.

Ao considerarmos um sensor com processador CC2500, o mesmo apresenta quatro diferentes modos de transmitir, cada um com uma potência de sinal já definida, conforme Tabela 3. Dependendo da distância entre os dispositivos escolhe-se uma determinada potência de transmissão. Por exemplo: conforme (FARAHANI, 2011) se a sensibilidade do receptor é -95dBm, F_m recomendada para um determinado ambiente é de 8dBm, e conforme (INSTRUMENTS, 2008) a sensibilidade da potência do sinal na recepção do CC2500 é de -104dBm, portanto consideraremos $F_m = 8\text{dBm}$; $P_0 = 0\text{dBm}$, considera-se uma antena sem ganho; $P_r = -104\text{dBm}$; frequência $f=2.4\text{GHz}$; consideramos um sistema em um meio livre, ou seja, $N=2$, conforme Tabela 4. Aplicando as configurações na Equação 6 teremos:

$$R = d = 10^{\frac{0\text{dBm} - 8\text{dBm} - (-104\text{dBm}) - 10 * 2 * \text{Log}_{10}(2400) + 30 * 2 - 32.44}{10 * 2}} = 627$$

Portanto, para uma transmissão em 0dBm a distância é de 627 metros entre o transmissor e o receptor, para -12dBm o alcance é de 157 metros, ou seja, pode-se reduzir a corrente elétrica na transmissão de 21,2mA para 11,1mA que corresponde a uma redução significativa no consumo de potência. Na Tabela 5 é apresentado o alcance do sinal em relação à potência de transmissão e em relação ao meio em que o sinal é transmitido.

Tabela 4: Índice de interferência do meio

Ambiente	N
Espaço Livre	2
Área Urbana	3,5
Fábrica	3
Sala de conferências com mesas e cadeiras	2,09

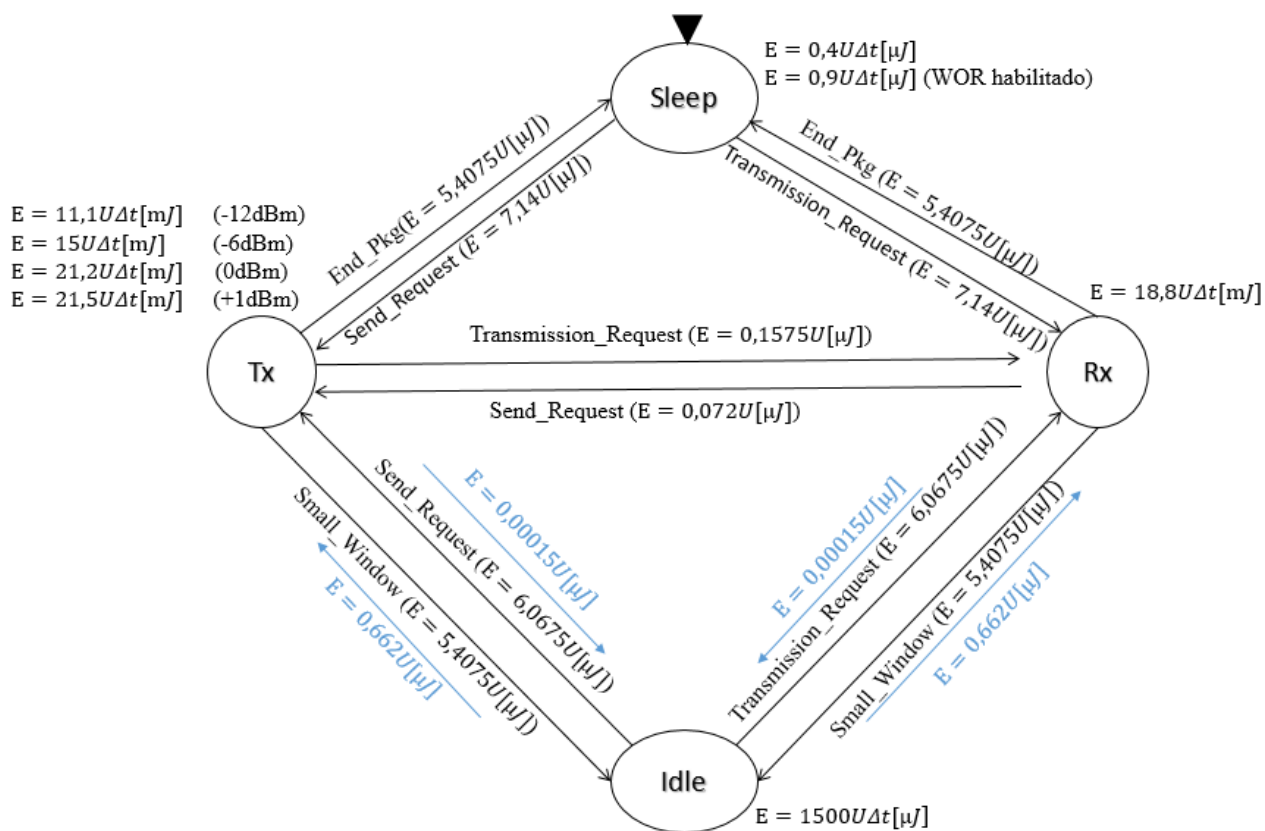
Tabela 5: Distância de alcance em relação à potência do sinal e o ambiente de transmissão

Potência de transmissão	Ambiente	Distância (m)
-12dBm	Espaço Livre	157,68
	Área Urbana	12,38
	Fábrica	21,80
	Sala de conferências com mesa e cadeiras	122,12
-12dBm	Espaço Livre	157,68
	Área Urbana	12,38
	Fábrica	21,80
	Sala de conferências com mesa e cadeiras	122,12
-6dBm	Espaço Livre	314,62
	Área Urbana	18,38
	Fábrica	34,55
	Sala de conferências com mesa e cadeiras	236,51
0dBm	Espaço Livre	627,75
	Área Urbana	27,27
	Fábrica	54,78
	Sala de conferências com mesa e cadeiras	458,0
+1dBm	Espaço Livre	704,35
	Área Urbana	29,13
	Fábrica	59,12
	Sala de conferências com mesa e cadeiras	511,43

A Figura 11 apresenta a máquina de estados que será utilizada para medir o consumo de energia na transição entre um estado e outro, e o consumo de energia em função do tempo durante a permanência no estado. Uma observação importante a ser feita nesta máquina é que não existe uma transição real entre os estados Tx/Rx e $Sleep$, portanto trata-se de uma abstração da real máquina de estados do módulo de RF, pois se sabe que antes de atingir o estado $Sleep$ é necessário atingir o estado $Idle$. Estas abstrações do *hardware* são convenientes visto que somente são relevantes os estados que têm um consumo significativo de energia.

Dessa forma quando o sistema não está transmitindo ou recebendo informação deve-se optar por um estado que tem o menor consumo de energia, ou seja, o estado $Sleep$. Entretanto,

Figura 11: Máquina de estado da unidade de RF(CC2500), t corresponde ao tempo e U corresponde a tensão elétrica



existe um gasto de energia de reativação do estado *Sleep* para um estado de transmissão, logo decisões devem ser tomadas. Em seguida, será criado um conjunto de equações e inequações que fará com que seja escolhido o estado com menor consumo de energia. Para facilitar matematicamente, os estados *Rx* e *Tx* serão considerados como um estado *RxTx*, pois o gasto energético na transição de *Rx* para *Idle* ou *Sleep* é o mesmo gasto de quando a origem é *Tx*.

Abaixo são apresentadas as equações de transições entre estados. Considera-se nestas equações que a tensão $U=3V$, Δt é tempo de permanência no estado *Sleep* e as letras (A.V.s) correspondem respectivamente unidade de medida da corrente elétrica, unidade de medida de tensão elétrica e unidade de medida de tempo em segundo. Além disso, o produto entre tensão (V), corrente (A) e tempo (s) tem como resultado energia em *Joule* (J), ou seja, a energia consumida considerando uma determinada tensão com uma determinada corrente num intervalo de tempo.

- $R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x$ (WOR desabilitado):

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = E_{R_x T_x \rightarrow Sleep} + E_{Sleep} + E_{Sleep \rightarrow R_x T_x}$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = 5,4075 * 3\mu(V.A.s) + 0,4 * 3\Delta t\mu(V.A) + 7,14 * 3\mu(V.A.s)$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = (37,6425\mu(V.A.s) + 1,2\Delta t\mu(V.A))$$

- $R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x$ (WOR habilitado):

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = E_{R_x T_x \rightarrow Sleep} + E_{Sleep} + E_{Sleep \rightarrow R_x T_x}$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = 5,4075 * 3\mu(V.A.s) + 0,9 * 3\Delta t\mu(V.A) + 7,14 * 3\mu(V.A.s)$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)} = (37,6425\mu(V.A.s) + 2,7\Delta t)\mu(V.A)$$

- $R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x$ (PLL calibration):

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = E_{R_x T_x \rightarrow Idle} + E_{Idle} + E_{Idle \rightarrow R_x T_x}$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = 5,4075 * 3\mu(V.A.s) + 1500 * 3\Delta t\mu(V.A) + 6,0675 * 3\mu(V.A.s)$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = (34,425\mu(V.A.s) + 4500\Delta t)\mu(V.A)$$

- $R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x$ (sem PLL calibration):

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = E_{R_x T_x \rightarrow Idle} + E_{Idle} + E_{Idle \rightarrow R_x T_x}$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = 0,00015 * 3\mu(V.A.s) + 1500 * 3\Delta t\mu(V.A) + 0,662 * 3\mu(V.A.s)$$

$$E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} = (1,89645\mu(V.A.s) + 4500\Delta t)\mu(V.A)$$

Considerando que o objetivo é reduzir o consumo de energia e que o estado *Sleep* é o que consome menos energia, partimos da premissa que $E_{(R_x T_x \rightarrow Idle \rightarrow R_x T_x)} > E_{(R_x T_x \rightarrow Sleep \rightarrow R_x T_x)}$, logo $34,425\mu(V.A.s) + 4500\Delta t)\mu(V.A) > (37,6425\mu(V.A.s) + 1,2\Delta t)\mu(V.A.s)$, simplificando a operação $4498,8\Delta t\mu(V.A) > 3,2175\mu(V.A.s)$, resolvendo a inequação $\Delta t > 0,71519ms$. Portanto, se o módulo de RF ficar por um período superior a $0,71519ms$, a melhor escolha é o estado *Sleep*, considerando *WOR habilitado*. A Tabela 6 apresenta o tempo mínimo necessário para que o estado *Sleep* seja escolhido.

Tabela 6: Critério de escolha para troca de estados (*sleep* ou *idle*)

WOR	PLL Calibration	Tempo mínimo para <i>Sleep</i>
Desabilitado	Habilitado	$\Delta t > 0,71519ms$
Desabilitado	Desabilitado	$\Delta t > 7,9456ms$
Habilitado	Habilitado	$\Delta t > 0,7154ms$
Habilitado	Desabilitado	$\Delta t > 7,9483ms$

3.2 ESPECIFICAÇÃO DO ALGORITMO PROPOSTO

Em linhas gerais, o algoritmo proposto representa um protocolo de acesso ao meio, responsável por estabelecer uma lógica quanto ao uso do meio de transmissão em topologias de redes. Esta seção do trabalho apresenta o novo protocolo de acesso ao meio baseado em TDMA *Sleep Scheduling*.

3.2.1 Protocolo de Acesso ao Meio Baseado em TDMA Sleep Scheduling

O maior gasto de energia em RSSF está relacionado à comunicação de rádio frequência em transmitir e receber dados. Um protocolo de roteamento é responsável por determinar a forma como esses dados são transmitidos pela rede até uma BS. Portanto, trata-se de uma técnica (na camada de enlace) de extrema relevância para um consumo eficiente de energia.

No protocolo TDMA cada nó tem acesso a um *slot* de tempo dedicado, no qual pode enviar e/ou receber dados utilizando toda a largura de banda do canal. Em RSSF, esse protocolo contribui com a redução do consumo de energia, pois cada sensor passa a maior parte do tempo sem transmitir ou receber dados da rede. Assim cada sensor pode permanecer em um estado de dormência e acordar somente quando estiver em seu *slot* de tempo.

O protocolo de acesso ao meio baseado em TDMA proposto neste trabalho, consiste em dividir o tempo em partes iguais para cada nodo sensor levando em consideração quanto crítico o sistema monitorado se encontra. Dessa forma, cada nodo sensor transmite seus dados obedecendo a uma agenda e cada nodo sensor possui um *slot* de tempo fixo durante um *frame*, mas em um *frame* futuro o tempo de *slot* pode aumentar ou diminuir dependendo da criticidade do ambiente. Entende-se por crítico, como um sistema em que suas características causam riscos inerentes a danos físicos, pessoal e/ou financeiro. Desta forma quando o sistema sai de seu estado de conforto (estável) e vai para um estado de risco (instável) ele se torna mais crítico, e a carga de dados transmitida é aumentada.

Como dito anteriormente, cada nodo tem um *slot* de tempo em que fica transmitindo ou recebendo. Entretanto, nem todo nodo sensor tem algo a transmitir quando recebe seu *slot* de tempo, isto ocorre devido ao fato que não ocorreu alteração significativa nas variáveis

“sensoriadas”, ou seja, o ambiente está estável para aquela situação monitorada e, portanto, a frequência de monitoramento pode ser reduzida, de forma a otimizar o consumo de energia.

Tal redução pode ser feita através do aumento do *slot* de tempo, pois aumentando o espaço de tempo em que cada sensor pode transmitir, além de aumentar a probabilidade de encontrar uma variação significativa também reduz o consumo de energia, pois na ausência de transmissão ou recepção de dados o módulo de rádio entra em estado de *Sleep*.

Além disso, o aumento no *slot* de tempo não significa que o sensor que se encontra no estado de transmissão gaste mais tempo transmitindo, pois só são transmitidos valores significativos, ou seja, um determinado sensor pode entrar em *Sleep* antes de acabar seu *time-slot*. Assim como existe a possibilidade deste mesmo sensor não conseguir transmitir todos os dados em seu *time-slot*.

pode ser o caso do período de monitoramento estar muito elevado

No caso de não existir desperdício de *slot* de tempo pode ser o caso do período de monitoramento estar muito elevado, ou seja, existe muita variação no ambiente e, portanto, *time-slot* deve ser reduzido, pois alguma situação crítica está ocorrendo e outros nodos devem ser consultados. Desta forma todo o sistema é monitorado com maior frequência.

A Figura 12 tem como objetivo apresentar o sistema de agendamento TDMA, nesta figura pode ser observado que cada N *frame* é composto por M *time-slot* e cada *time-slot* pode emitir K pacotes. Nesta mesma figura, as linhas que conectam *Slot-i*, tal que $i = [0; M]$, indica que cada nodo sensor tem apenas um *time-slot*, podendo transmitir neste *slot* todos seus dados. A Equação 8, da média harmônica, foi a técnica utilizada para aumentar ou diminuir o *time-slot*.

$$H = \frac{M}{\sum_{i=1}^M \left(\frac{1}{X_i}\right)} \quad (8)$$

O algoritmo que resolve o problema da Equação 8 é apresentado na Figura 13.

Na Equação 8, H é a média harmônica, M é o número de sensores e X_i é o número de pacotes armazenados mas não enviados ao CH, devido ao curto *time-slot* do sensor i . Além de utilizar a média harmônica, alguns critérios devem ser estabelecidos, conforme segue:

- Se a quantidade total de pacotes válidos a serem transmitidos for equivalente à quantidade de pacotes possíveis de serem transmitidos durante um *frame*, então o tamanho do

Figura 12: Acesso ao meio por divisão de tempo baseado em TDMA

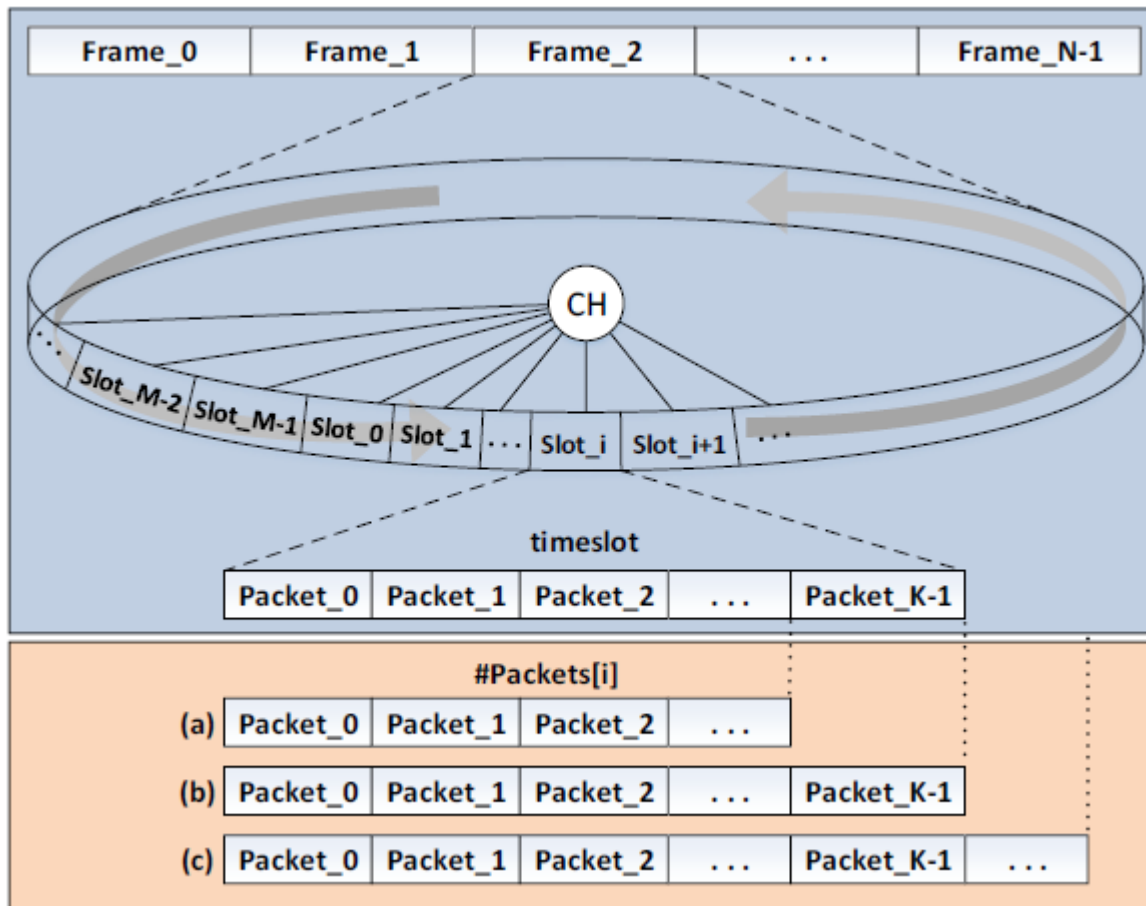


Figura 13: Algoritmo da média harmônica

```

1  double div ← 0.0, med ← 0.0, aux;
2  for(int i ← 0; i < M; i++) {
3      aux ← timeslot - #Packets[i];
4      if(aux == 0.0)
5          div ← 1.0;
6      else if(aux < 0.0)
7          div ← 1 + (aux * -1);
8      else
9          div ← 1 / aux;
10     med ← med + div;
11 }
12 if(med == 0)
13     return 0;
14 double H ← M / med;
15 if(H < 1.0)
16     return (int)Math.round((H - (int)H) * 10) - 10;
17 return (int)H;

```

time-slot é adequado e neste caso o tamanho do *slot* do próximo *frame* não sofre alteração.

- $H=0$, Divisão por zero será considerado zero.
- Deve ser considerado um critério de parada no aumento ou diminuição do tamanho do *Slot*, pois o aumento pode tender ao infinito. Desta forma, será considerado neste trabalho, um *slot* mínimo de x segundos e um *slot* máximo de y segundos, sendo que x e y são valores que dependem da aplicação.
- $H \geq 1$, se a média harmônica for superior ou igual a um, então aumenta-se o *slot* com a parte inteira da média, exemplo: se $H=4,7$ então $time-slot = time-slot + 4$, pois se o valor for positivo é porque tem pouca variação no ambiente e, portanto, deve ser aumentado o *time-slot*, para deixar mais tempo em *sleep*. Quanto maior for o valor de H , mais afastado do estado crítico o sistema se encontra.
- $0 < H < 1$, se o valor da média harmônica for maior que zero e menor que um, então, diminui-se o *time-slot* com este valor multiplicado por dez, exemplo: se $H=0,6$ então $time-slot = time-slot - 6$, ou seja, há uma grande variação no ambiente e a frequência de coleta deve ser aumentada. Quanto menor o valor de H , maior é a quantidade de dados a ser enviados para CH.
- $H \leq 0$, se a média harmônica for inferior ou igual a zero o *time-slot* não se altera.

3.2.2 Sincronização dos relógios em TDMA

Os protocolos tradicionais usados para sincronização de relógios em redes cabeadas normalmente não são adequados para RSSF, principalmente devido a suas limitações em fornecimento de energia, largura de banda, *hardware* e instabilidade nas conexões.

Em (SUNDARARAMAN; BUY; KSHEMKALYANI, 2005), é realizada uma análise quanto à sincronização dos relógios em diversos protocolos de sincronização, para os quais foi analisado, tempo de convergência, precisão, tamanho da rede, exatidão, complexidade, escalabilidade, tolerância a falhas e eficiência energética. Entre os protocolos analisados, os dois que apresentaram as melhores características para RSSF foram RBS (ELSON; GIROD; ESTRIN, 2002) e

Network-wide time synchronization in sensor networks (GANERIWAL; KUMAR; SRIVASTAVA, 2003). O primeiro tem como vantagens alta exatidão, alta escalabilidade e alta eficiência energética, e apresenta como desvantagens alta complexidade e não tolerante a falhas. Enquanto o segundo apresenta como vantagens alta escalabilidade, baixa complexidade, alta exatidão e tolerância a falhas.

Neste trabalho não será analisada toda a arquitetura, pois o mesmo se concentra apenas no acesso ao meio, portanto será considerado a sincronização entre o CH e seus respectivos SNs.

A Figura 14 tem como objetivo apresentar o funcionamento deste protocolo para um CH em específico. Primeiramente, o CH envia uma mensagem de sincronização para todos os nodos sensores pertencentes a este *cluster*, esta mensagem é composta pelo ID e o *time* em que foi enviado, cada nodo sensor responde a esta mensagem com seu ID, T_2 e T_3 , sendo que T_2 corresponde ao *time* de recepção da mensagem e T_3 corresponde ao *time* de envio da resposta, CH recebe sua resposta no *time* T_4 . O próximo passo consiste em calcular o tempo de propagação do sinal entre o CH e os respectivos SNs.

Considera-se neste trabalho que a rede é estática, portanto o tempo de propagação do sinal entre T_1 e T_2 é o mesmo tempo gasto entre T_3 e T_4 . Outra consideração que deve ser feita é que existe um período entre o tempo de recepção e transmissão do sensor (T_2 e T_3).

Após tais considerações e de posse de todos os tempo de chegada e saída dos nodos origem e destino (T_1, T_2, T_3 e T_4) o CH pode realizar seus cálculos de sincronização da seguinte forma: $\delta = \frac{T_1 - T_2}{2}$, $d = T_2 - T_1$, onde δ representa o período médio entre a chegada da solicitação e a transmissão da resposta. Considerando que se trata de uma rede com sensores homogêneos este valor será considerado igual para todos os nodos, a variável d representa o atraso na propagação do sinal, por fim o CH envia uma mensagem de ajuste dos relógios.

Visto que a atraso d é constante ao longo do tempo, pois trata-se de uma rede estática com distâncias constantes, e que δ também é constante, pois o módulo de processamento é sempre o mesmo para todos os nodos sensores, temos que o processo realizado na Figura 14 só se faz necessário no início da configuração da rede, obviamente o CH deve armazenar em uma tabela os valores d e δ referente a cada sensor. Desta forma, para realizar a sincronização do relógio de cada SN basta enviar junto com o *time-slot* o valor $d + \delta + T_4$, onde T_4 corresponde

Figura 14: Obtenção do tempo de propagação entre CH e SNs

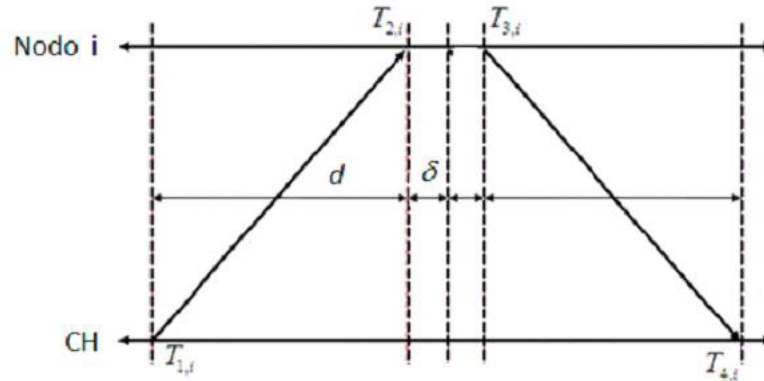


Figura 15: Representação do Frame 802.15.4 transmitido entre CH e SNs

Quadro 802.15.4			
(3-37)B	(3-7)B	2B	
Cabeçalho MAC	Pacote de dados		CRC
	2B	2B	2B
	$d+\delta+T_4$	time-slot	ID

ao *time* atual do CH. A Figura 15 representa o formato do pacote que será enviado para cada nodo.

O pacote de dados representado pela Figura 15 é enviado do CH para os SNs sempre que chegar ao final de um *frame* TDMA, ou seja, quando todos os sensores enviarem seus dados. Ao passo que o pacote enviado dos SNs ao CH tem os primeiros 2 *bytes* do *MAC Payload* ($d + \delta + T_4$) vazio e no lugar de *time-slot* é enviado a variável coletada do ambiente.

3.3 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA VALIDAÇÃO

Neste tópico será apresentado o ambiente de simulação necessário para obtenção e análise de resultados, os quais serão comparados com trabalhos relacionados no capítulo de avaliação.

Para simular o algoritmo proposto na Figura 12 foi criado um fluxo lógico de operação apresentado na Figura 16. Nesse fluxo, inicialmente é criado um número M de sensores e um CH. Os sensores recebem as configurações básicas, tais como frequência de rádio e frequência

de coleta de variáveis ambientais. O CH está configurado para receber e transmitir dados, conforme protocolo TDMA, esta configuração é estabelecida após a definição de um tamanho inicial de *time-slot*, e em seguida, este valor é enviado para todos os nodos sensores, juntamente com a agenda correspondente para cada nodo e a sua sincronização de relógio.

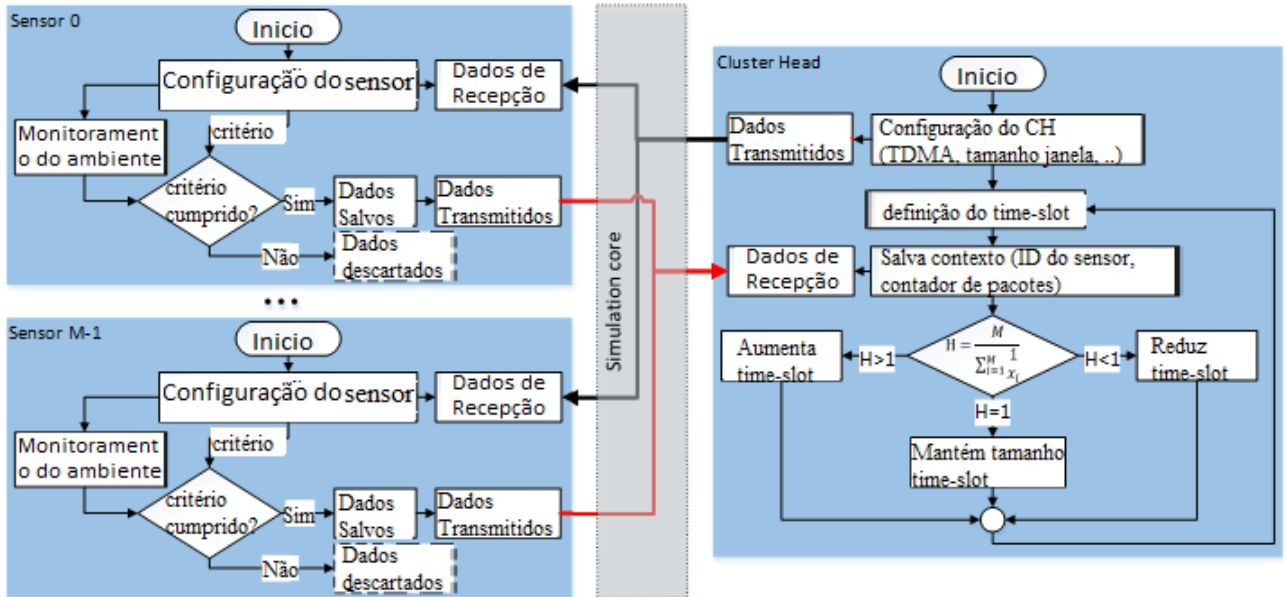
A comunicação entre sensores e CH é gerenciada pelo simulador WiNeS (BOHRER et al., 2012) e (BOHRER et al., 2013), que é um simulador RSSF que suporta eventos discretos, modelos síncronos e assíncronos, oferece um ambiente para uma variedade de modelos de simulação, permitindo a utilização de qualquer topologia de rede, protocolo ou dispositivos.

O consumo de energia é registrado através da ativação da máquina de estado, que é atualizada a cada segundo, a qual pode alterar de estado ou permanecer no mesmo. A cada atualização da FSM um arquivo CSV é editado com atualizações do consumo de energia. Por fim os resultados obtidos neste arquivo são utilizados para gerar gráficos, que estão disponíveis no capítulo de avaliação.

A Figura 17 representa a interface gráfica do módulo desenvolvido para simular o novo protocolo, esta interface foi dividida em 6 abas. Conforme segue:

- I) *Sensing Config*, corresponde a configuração da máquina de estado de “sensoriamento”. Os valores informados nesta primeira aba correspondem aos valores específicos de fábrica do sensor CC2500, já discutido em capítulos anteriores. O campo frequência corresponde à frequência com que as variáveis serão coletadas, desta forma, o valor 2, neste campo, indica que será realizado uma coleta a cada 2 segundos.
- II) *MCU*, esta aba serve para registrar a tensão de alimentação e as correntes, para cada estado do microcontrolador MSP430. Obviamente que o tempo para executar uma tarefa não é sempre o mesmo, no entanto, como o nodo sensor tem funções bem definidas, foi possível especificar o valor médio, o qual está apresentado nesta segunda aba. O fato de utilizar o TDMA como protocolo de acesso ao meio, o qual tem como característica divisão de tempo, foi possível implementar um algoritmo que facilmente descobre se o próximo estado após a execução deve ser *Sleep* ou *Idle*.
- III) *Radio Switch State*, nesta aba foi registrado o tempo e a corrente consumida durante a transição entre os estados do microcontrolador de rádio CC2500.

Figura 16: Fluxograma básico de simulação



- IV) *Radio in State*, representa os valores da corrente e tensão quando o nodo se encontra em um determinado estado no módulo de rádio, assim, para saber o consumo no estado Rx, basta multiplicar o valor deste campo com o valor do campo de tensão e pela variação do tempo gasto, sendo que o tempo gasto é dado pela Equação 5. O campo Tx foi posto como valor default 0dBm para a potência de sinal de transmissão. Entretanto o algoritmo, realiza um cálculo de distância entre o receptor e o transmissor e assim aplica uma potência de sinal mais adequada. Observa-se também nesta aba informações referentes ao ambiente ao qual a rede está inserida, fazendo com que o usuário possa escolher entre, ambiente livre, centro de uma cidade, dentro de uma indústria e etc. Conforme o ambiente escolhido o algoritmo encontra uma potência de sinal de transmissão adequada, ou seja, de forma a alcançar o nodo alvo considerando a interferência do meio.
- V) *Memory*, nesta aba é informado o consumo de energia para escrever ou ler um *byte* da memória. A aba *Execution* apenas serve para executar o sistema.

Observa-se na Figura 17 que este modelo energético pode ser utilizado para simular qualquer nodo sensor que apresenta as mesmas características de consumo de energia, ou seja, nodos sensores composto por uma unidade de processamento, uma unidade de memória, uma

Figura 17: Interface gráfica para configuração do modelo energético dos sensores

The figure displays four panels of the configuration interface, each with a state transition diagram to its right.

Panel 1: Sensing Config
 Parameters: Eon_off[μj] (0.0624E-6), Voltage[v] (3), time (ms) (0.03E-3), Eoff_on[μj] (0.0624E-6), I[mA] (0.16E-3), Frequency(s) (2).
 Diagram: A vertical flow from 'On' to 'Off'.

Panel 2: MCU
 Parameters: Current Run[A] (2.7E-3), Time in Run[s] (7E-3), Current Idle[A] (1.1E-6), Voltage[v] (3), Current Sleep[A] (0.9E-6).
 Diagram: A central 'Run' node connected to 'Sleep' and 'Idle' nodes.

Panel 3: Radio Switch State
 Table of transition parameters:

Switch	Current(A)	Time(s)	Switch	Current(A)	Time(s)
Current Rx to Tx	7.5E-3	0.0096E-3	Current Tx to Idle	7.4E-3	0.721E-3
Current Tx to Rx	7.5E-3	0.0215E-3	Current Tx to Sleep	7.5E-3	0.721E-3
Current Idle to Tx	7.492E-3	0.809E-3	Current Rx to Sleep	7.5E-3	0.721E-3
Current Idle to Rx	7.492E-3	0.809E-3	Current Sleep to Tx	11.95E-3	1.259E-3
Current Rx to Idle	7.492E-3	0.0884E-3	Current Sleep to Rx	11.95E-3	1.259E-3

Additional parameters: Tx (0Dbm) (21.2E-3), Rx (13.3E-3), Idle (1.5E-3), Sleep (0.4E-6), Voltage[v] (3).
 Radio environment: free environment.
 Options: PLL Calibration in exchange for Idle state, WOR (wake-on-radio) in Sleep Radio.
 Diagram: A central 'Idle' node connected to 'TX', 'Rx', and 'Sleep' nodes.

Panel 4: Memory
 Parameters: Read[j/Byte] (8.2E-6), Write[j/Byte] (34.9E-6).
 Diagram: A 'Flash' memory structure with 'Write' and 'Read' nodes connected to an 'Off' node.

unidade de rádio frequência e uma unidade de sensoriamento, além disso pode ser simulado considerando vários ambientes, bastando apenas mudar os valores dos campos.

Na Figura 18 é apresentado os objetos e seus métodos que foram implementados para gerar o ambiente de simulação, o simulador WiNeS não está sendo representado nesta figura. O diagrama que interliga todos esses métodos está representado na Figura 19.

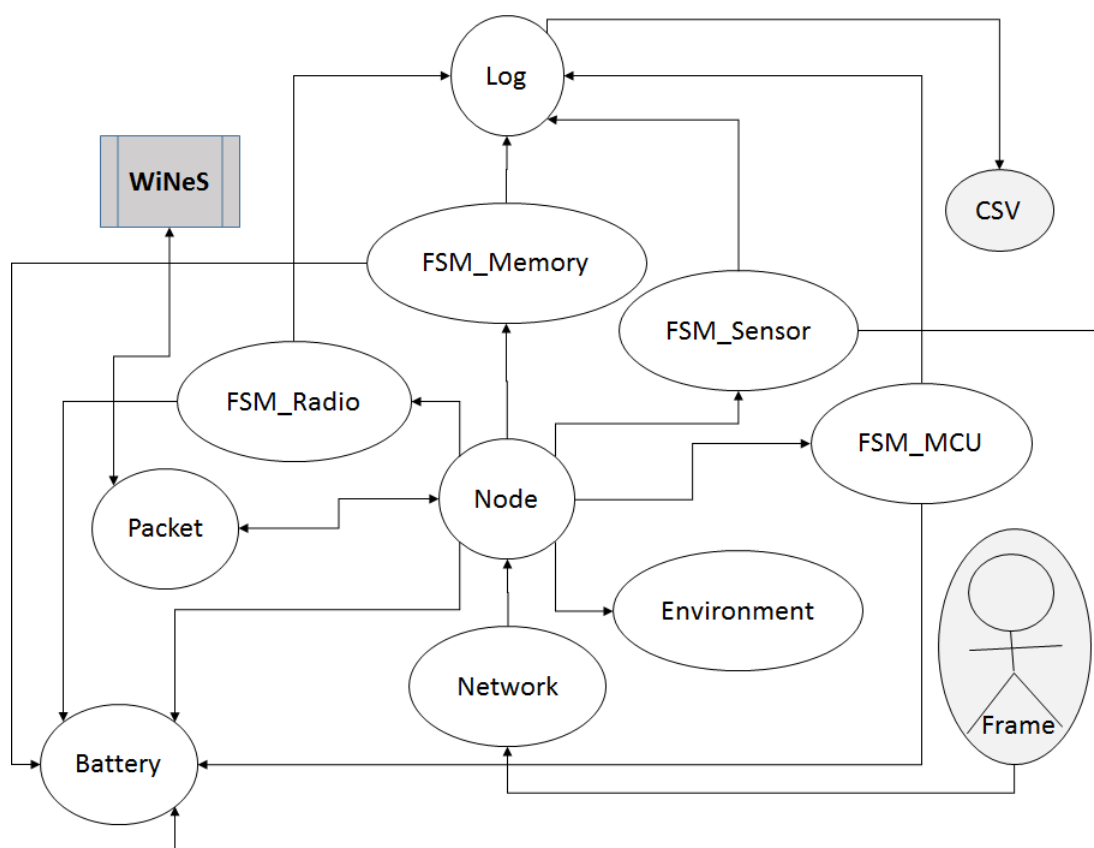
Figura 18: Representação dos objetos e seus respectivos métodos do ambiente de simulação



A Figura 19 apresenta as interconexões entre os objetos, nesta figura o objeto Frame representa a interface gráfica entre o ambiente de simulação e o usuário do sistema. Através do comando do usuário o objeto Network é executado, que por sua vez cria os nodos sensores, gera coordenadas geográficas para cada nodo e configura a rede para trabalhar como um protocolo TDMA. Cada objeto Nodo cria seu conjunto de máquinas de estados, além de criar os objetos: Battery, Environment e Packet.

Os objetos FSM_Memory, FSM_Sensor, FSM_MCU e FSM_Radio consomem energia da bateria através de Battery. Quando o Nodo estanca as máquinas de estados todas iniciam com um estado default, Sleep para FSM_Radio e FSM_MCU e Off para FSM_Memory e FSM_Sensor. O objeto Packet é o que faz interface com o simulador WiNeS, é o pacote transmitido entre simulador e ambiente de simulação. O consumo de energia é dado da seguinte forma: I) Quando o Nodo busca uma variável armazenada no Environment o mesmo ativa a máquina de estados FSM_Sensor, que por sua vez registra o consumo na bateria através do objeto Battery e envia este consumo para o objeto Log, a função de Log é registrar no arquivo CSV tudo que recebe das máquinas de estados; II) Ao armazenar o valor “sensoriado” o Nodo ativa FSM_Memory e FSM_MCU, que, da mesma forma anterior, consomem energia e enviam seus valores ao Log; III) quando o Nodo alcança sua janela de tempo o mesmo envia seus dados para o simulador do objeto Packet e ao mesmo tempo ativa a máquina de estado FSM_Radio que realiza a mesma operação das máquinas anteriores; IV) O algoritmo que realiza a troca de estados fica dentro da própria máquina de estado, mas o objeto que percebe a necessidade de trocar de estado é o Nodo, ou seja, este objeto ativa as FSMs informado o próximo estado e estas por sua vez realizam a troca, consumindo energia da bateria e enviando o valor consumido ao Log.

Figura 19: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação



4 AVALIAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos na simulação, conforme especificado no capítulo de validação. Esses resultados serão comparados com o estado da arte para chegar a uma conclusão sobre a eficiência do novo modelo.

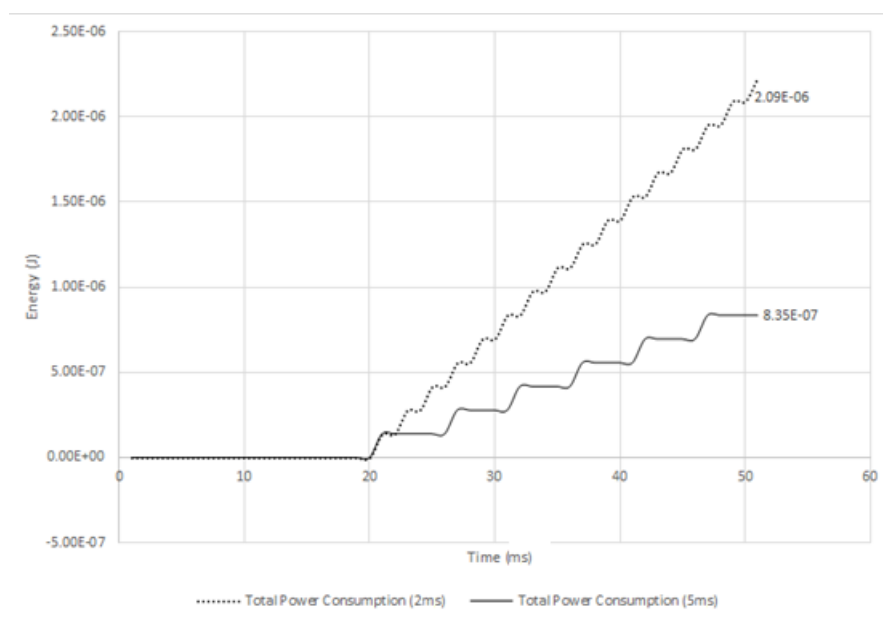
4.1 AVALIAÇÃO DO MODELO ENERGÉTICO

A avaliação do modelo energético será dada conforme especificado na validação e comparado com especificações de fábrica definido no Capítulo 3, que descreve as especificações de fábrica do nodo sensor CC2500.

4.1.1 Modelo energético da unidade de sensoriamento

A Figura 20 apresenta o gráfico de consumo de energia ao longo de 50ms. Neste gráfico pode-se observar que a linha pontilhada, que representa o consumo durante 50ms realizando uma leitura a cada 2ms tem um consumo superior ao consumo representado pela linha sólida, que realiza uma leitura a cada 5ms. Portanto o consumo de energia para esta unidade dependerá exclusivamente da frequência de sensoriamento, para um mesmo sensor, conforme Equação 3 apresentada anteriormente. Outra observação que deve ser feita neste gráfico é que quando o sensor está no estado de transmissão para a máquina de estado de Rádio, o mesmo se encontra em *Off* para a máquina de estados de sensoriamento, conforme representado pelo intervalo de 0ms a 20ms.

Figura 20: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação



Observa-se na Figura 20 que a simulação dos resultados são muito próximos dos valores reais, conforme Equação 3 e dados obtidos de (INSTRUMENTS, 2012), (MORALES; SHIVERS, 2007) e (MOSCHITTA; NERI, 2014), pois o intervalo de 20ms a 50ms tem 15 coletas de variáveis ambientais, representado pela linha pontilhada, aplicando este valor na Equação 3 teremos $2,088\mu J$.

Entretanto em aplicações reais raramente se deseja fazer leitura de temperatura em milissegundos, mas sim com período de coleta em unidades de segundos, ou seja, com duas leituras por minuto teria um consumo de 0,14J por ano. Nos próximos tópicos observar-se-á que este consumo é insignificante quando comparado ao módulo de rádio, processamento e memória, entretanto esta unidade representa o quarto componente com maior consumo de energia, para este modelo de sensor.

4.1.2 Modelo energético da unidade de processamento

A Figura 21 apresenta o consumo de energia ao longo dos 20ms do módulo de processamento de dados de um sensor, observa-se nesta figura e na Tabela 7 que a máquina de

estados alterna entre *Run* e *Sleep*, alternando entre estes dois estados nos primeiros 10ms, após permanece constantemente no estado *Sleep* até serem solicitadas novas operações.

Figura 21: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação

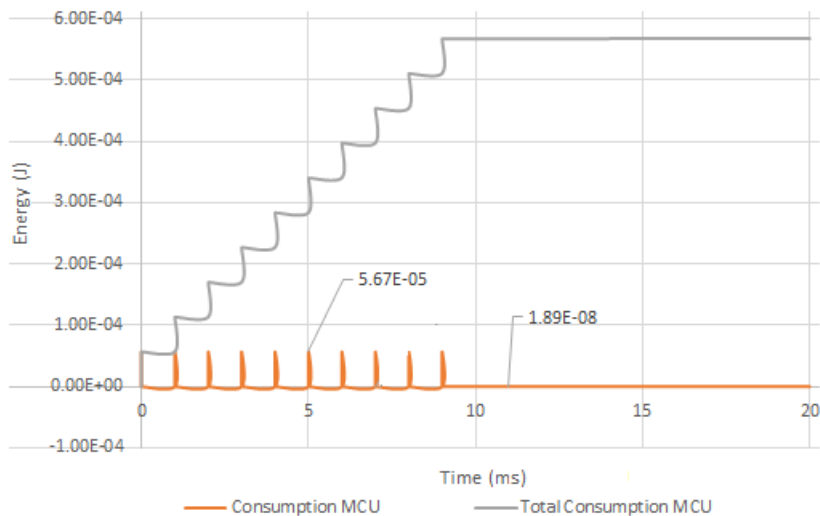
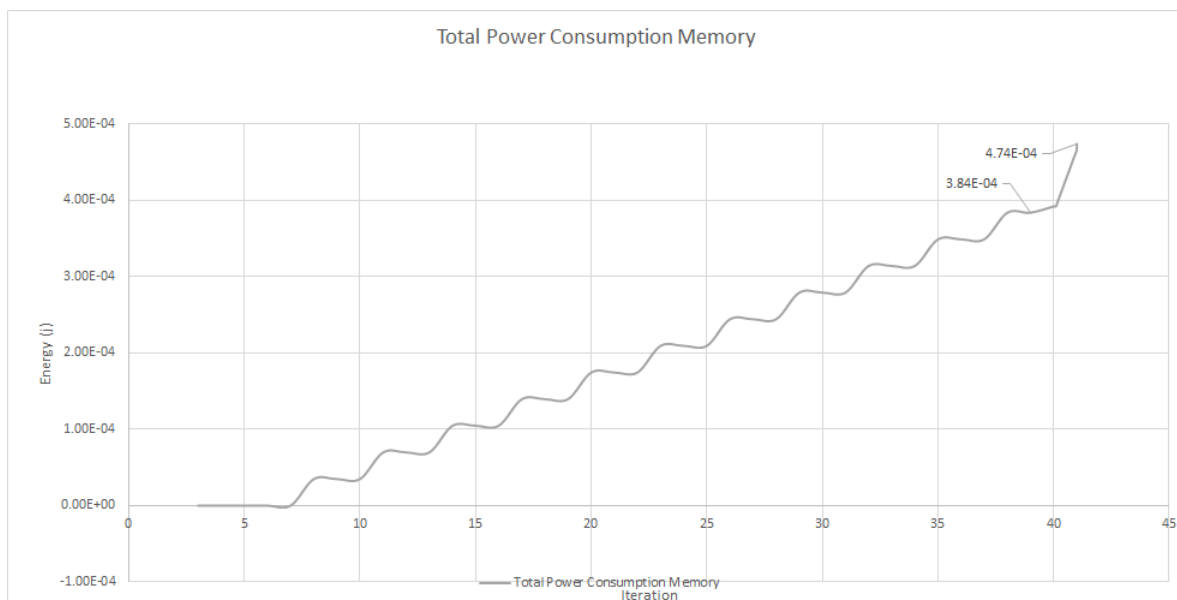


Tabela 7: Consumo de energia na transição e na permanência dos estados *sleep* e *run* da máquina de estado do microcontrolador

Power Consumption MCU	Total Power Consumption MCU	State
4.05E-09J	4.05E-09J	SleepToRun
5.67E-05J	5.67E-05J	Run
4.05E-09J	5.67E-05J	RunToSleep
1.89E-08J	5.67E-05J	Sleep
4.05E-09J	5.67E-05J	SleepToRun
5.67E-05J	1.13E-04J	Run
4.05E-09J	1.13E-04J	RunToSleep
1.89E-08J	1.13E-04J	Sleep
4.05E-09J	1.13E-04J	SleepToRun
5.67E-05J	1.70E-04J	Run
4.05E-09J	1.70E-04J	RunToSleep

4.1.3 Modelo energia da unidade de memoria

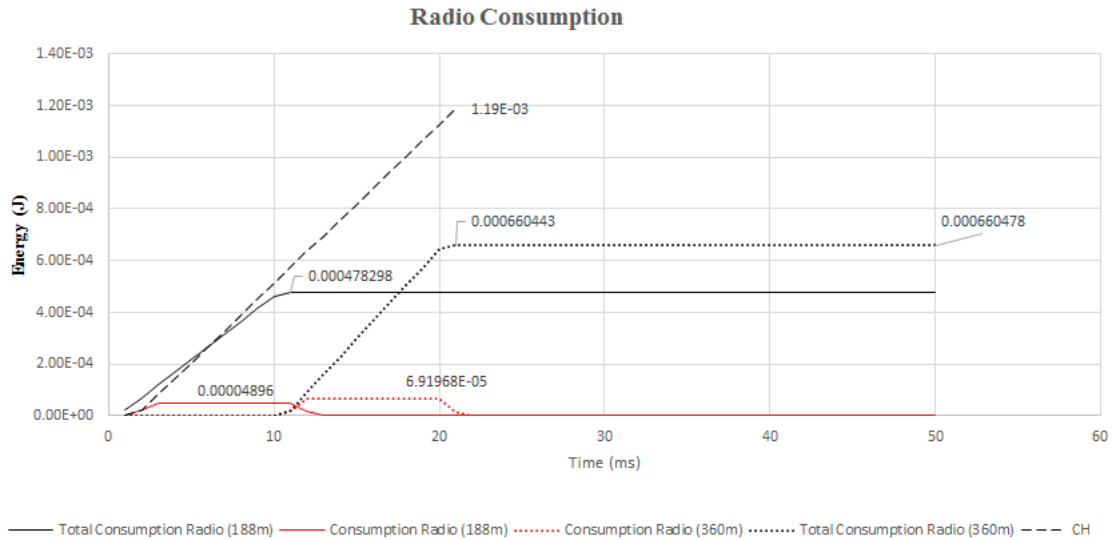
Figura 22: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação



A Figura 22 apresenta o consumo de energia no intervalo de 5ms a 41ms, o qual realiza onze escritas no banco de memória, gastando (11 *bytes* multiplicado por $34,9 \cdot 10^{-6}$) resultando em $3,84 \cdot 10^{-4} J$. Ao final realiza a leitura dos 11 *bytes* (11 multiplicado pelos $8,2 \cdot 10^{-6}$ somado aos $3,84 \cdot 10^{-4} J$ resulta em $4,74 \cdot 10^{-4} J$, conforme mostrado na figura). Após a leitura esta máquina de estados volta para o estado *Off* até ser solicitada uma nova leitura ou escrita. Observa-se nesta figura que o comportamento da FSM de memória é (*Write, Off, Write, Off, ..., Read, Read, Read...*). Este comportamento se deve ao sistema de acesso ao meio já discutido no Capítulo 3.

4.1.4 Modelo de energia da unidade de rádio frequência

Figura 23: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação

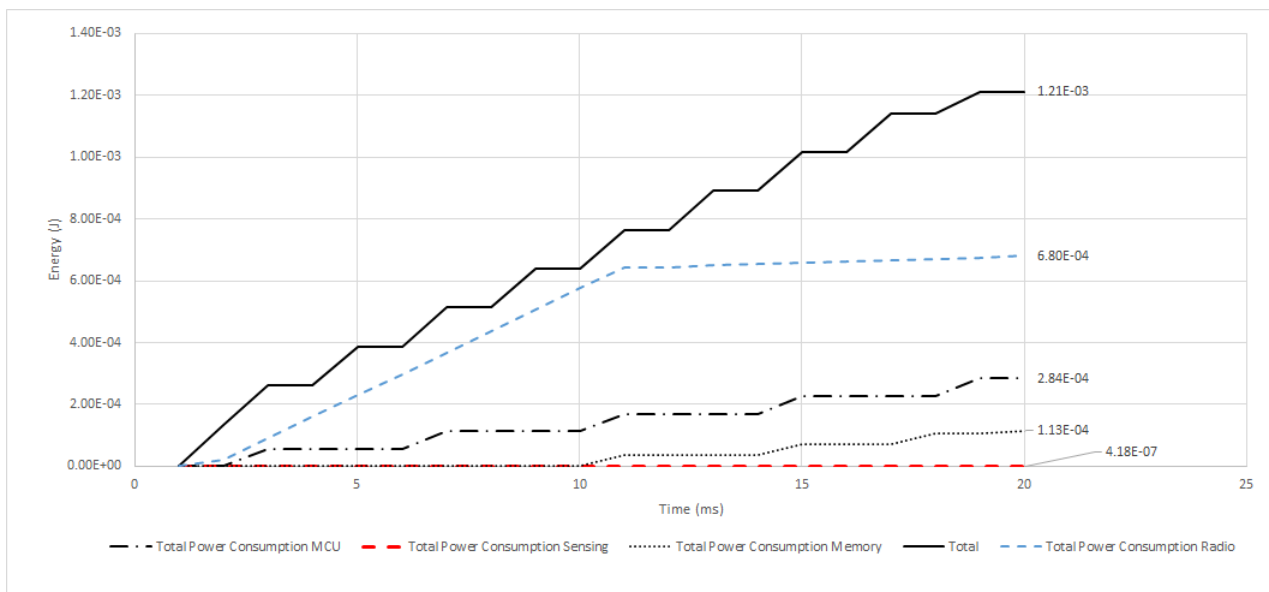


A Figura 23 apresenta o consumo de energia de dois sensores, o primeiro transmite do tempo 1ms aos 10ms, transmitindo um pacote a cada segundo com um custo de $4,9 \cdot 10^{-5} J$ por pacote, e totalizando um consumo de $4,78 \cdot 10^{-4} J$ (nove pacotes mais transição entre os estados *Tx* e *Sleep*). O segundo sensor (linha pontilhada) transmite do tempo 11ms ao tempo 20ms com um consumo superior, $6,92 \cdot 10^{-5} J$ de energia. Esta diferença se deve ao fato que este está a 360 metros de distância do receptor enquanto o primeiro está a 188 metros do receptor, conforme representado pela Figura 1. Na linha pontilhada está sendo apresentado o consumo total no ponto 21ms e o consumo total no ponto 50ms com o objetivo de mostrar que neste intervalo existe um pequeno consumo de energia de $3,5 \cdot 10^{-8} J$ (29ms em *Sleep*). A linha tracejada nesta figura representa o consumo no nodo sensor receptor CH que recebe os dados dos dois sensores, vale ressaltar que este trabalho não está sendo analisado o consumo do CH.

4.1.5 Análise do conjunto de modelos energéticos

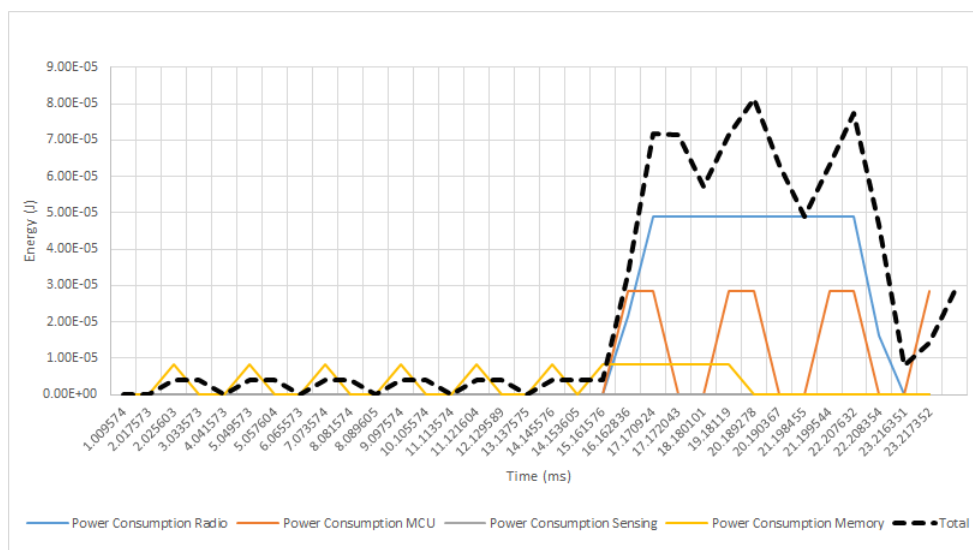
A Figura 24 apresenta o consumo total do sensor juntamente com o consumo de cada unidade nos primeiros 20ms de simulação. Pode ser observado neste gráfico, em ordem crescente de consumo de energia, o consumo da unidade de sensoriamento, consumo da unidade de memória, consumo da unidade de processamento e consumo da unidade de Rádio. Observa-se neste gráfico que o consumo de sensoriamento é o menor consumo de todos, praticamente insignificante quando comparado com as outras unidades de consumo, entretanto, esta unidade representa o quarto componente de hardware com maior consumo de energia, com isto, concluindo que o modelo energético se aproxima muito do sistema real.

Figura 24: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação



A Figura 25 ilustra que o módulo de rádio é predominante no consumo de energia, por este motivo que este trabalho concentra-se em reduzir o consumo de energia na transmissão de dados.

Figura 25: Diagrama que representa as principais interconexões entre os objetos do ambiente de simulação



4.2 AVALIAÇÃO DO NOVO PROTOCOLO BASEADO EM TDMA

Com o auxílio de três cenários de teste, foi possível fazer uma avaliação deste trabalho, os três cenários correspondem a sistemas em que a maior parte do tempo apresenta estabilidade no ambiente monitorado, entretanto, ao longo do tempo, o sistema pode se tornar crítico e o acompanhamento deve ser altamente controlado. Tais características são prioridades consideradas neste trabalho, além disso será analisado sistemas com variação de parâmetros ambientais homogêneas.

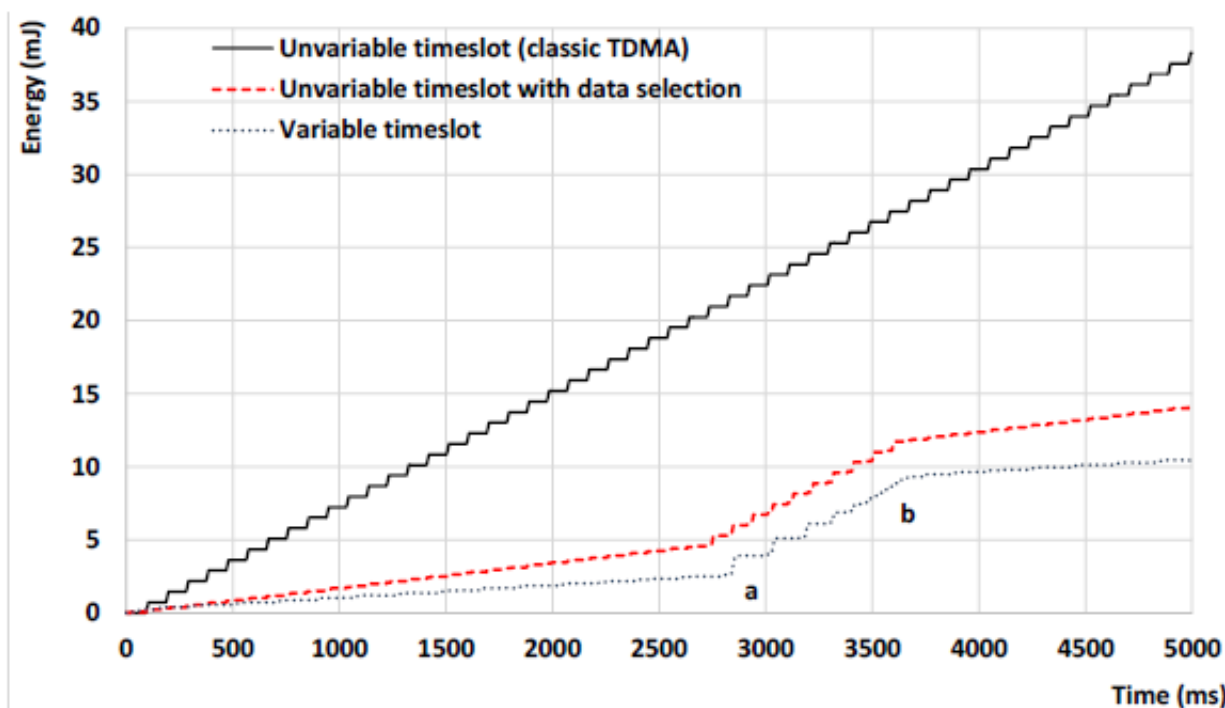
4.2.1 Simulação do cenário A

O primeiro cenário trata-se do monitoramento da unidade do solo onde pode ocorrer deslizamento de terra em períodos de chuva muito intensa. Esse fenômeno é responsável pelas maiores catástrofes que têm ocorrido nos últimos anos, como exemplos, o deslizamento de terra no Morro do Bumba, em Niterói Rio de Janeiro Brasil, no ano de 2010, causando aproximadamente 250 mortes e um prejuízo enorme para o estado; o deslizamento de terra em

2 de maio de 2014 no Afeganistão deixa pelo menos 350 mortos, segundo a ONU. Neste cenário normalmente a umidade do solo se encontra em uma certa estabilidade, que pode durar até um ou mais anos, nesta situação a frequência de monitoramento pode ser reduzida, faz-se isto através do aumento do *time-slot*, de forma que cada sensor passa um longo período em *Sleep* desta forma reduzindo o consumo de energia e quando um determinado sensor é escalonado a transmitir existem poucos dados para enviar ao CH, pois ocorreu pouca variação no ambiente, reduzindo ainda mais o consumo de energia. Porém, em algum momento o sistema sai da estabilidade devido a fortes chuvas, e neste momento o monitoramento deve ser intensificado, ou seja, reduzindo o *time-slot* para aumentar a frequência em que cada sensor envia seus dados ao CH, isto faz com que ocorre um aumento no consumo de energia, pois além de ter mais dados a transmitir o período em *Sleep* é reduzido.

A Figura 26 mostra que a maior redução no consumo de energia se deve ao fato de criar um critério de seleção para enviar apenas dados relevantes, quando comparado a um TDMA clássico que envia todos os dados possíveis durante seu *time-slot*, entretanto existe uma redução significativa quando aplicado uma flexibilização quanto o tamanho do *time-slot*, no gráfico desta figura a linha tracejada vermelha representa um TDMA clássico que envia todos os dados possíveis com um *time-slot* fixo, a linha pontilhada azul representa o consumo quando aplicado um critério de seleção de dados e a linha pontilhada representa o consumo quando aplicado a flexibilização no tamanho do *time-slot* do TDMA, para o mesmo critério de seleção de dados da linha tracejada.

Figura 26: Representação gráfica da média aritmética de cinco simulações de um dos dez sensores de umidade do solo. O consumo de energia corresponde aos valores do sensor de umidade do solo, HOBOnode com 2,4 GHz de frequência (INSTRUMENTS, 2009)



Observa-se na Figura 26 que o consumo de energia obedece a uma reta inclinada, indicando um consumo constante, mas em um determinado momento ocorre uma aceleração no consumo de energia e depois volta a ter um consumo constante novamente. Esta aceleração se deve ao fato que o sistema monitorado, neste caso a umidade do solo, atingiu um valor considerado crítico, portanto o controle deve ser intensificado, a quantidade de dados enviada ao CH é maior e cada nodo sensor fica menos tempo em *Sleep*.

A letra “a” e a letra “b” da Figura 26 representam respectivamente a latência de pior caso e a latência de melhor caso, a primeira ocorre quando o sistema está estável, portanto com um *time-slot* muito grande, e de forma abrupta o sistema entra em uma situação crítica levando a uma necessidade de aumento na frequência de monitoramento, ou seja, da estabilidade para uma situação crítica, onde se exige uma necessidade de aumentar a frequência de monitoramento e o melhor caso ocorre ao sair do estado crítico para o estado de estabilidade, momento em que não há necessidade de uma alta frequência no monitoramento, e, portanto a demora em aumentar o *time-slot* faz com que o sistema consome energia desnecessariamente.

4.2.2 Simulação do cenário B

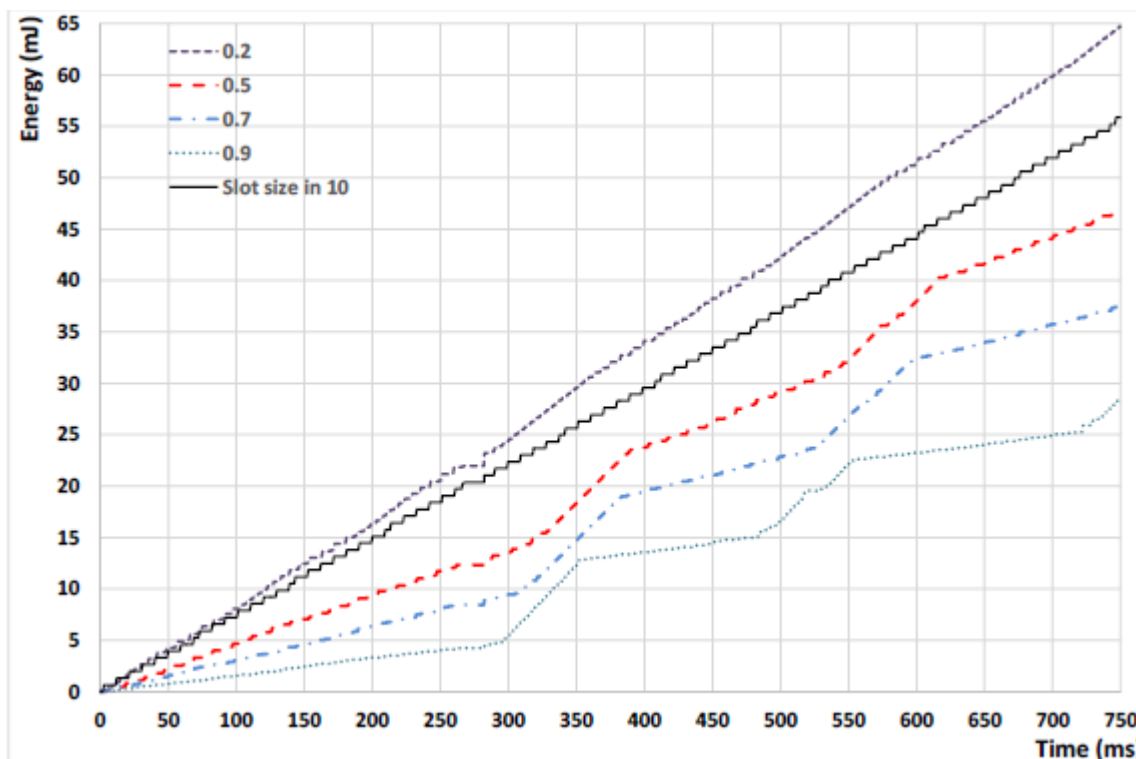
Existem ambientes onde a variação de temperatura deve ser muito pequena, como exemplo, uma fábrica de circuitos integrados. Esses ambientes costumam ser hermeticamente isolados e a entrada de pessoas ou objetos é mínima e controlada, uma vez que uma mínima variação de temperatura pode danificar o componente fabricado. Entretanto existe a necessidade, em algum momento do dia, de entrar e ou de sair funcionários ou objetos, fazendo com que a temperatura sofra uma variação acima do permitido. Assim, para esses casos, o uso de uma RSSF capaz de monitorar esta variação e, quando necessário, ativar um sistema que controla a temperatura da melhor forma possível, faz necessária.

A Figura 27 representa um intervalo do dia onde se tem uma temperatura estável na maior parte do tempo, mas acontece uma variação devido ao ingresso de pessoas no período da manhã e posteriormente a saída e reingresso no período de meio dia. Deseja-se uma temperatura estável em 20°C . Porém é muito difícil obter uma temperatura estável então é dado um limiar onde se aceita que a temperatura pode ter uma determinada variação e a RSSF só envia dados acima ou abaixo deste limiar, parte em azul desta figura. Logo, quanto maior o limiar menor a quantidade de dados a ser transmitida.

As temperaturas que ultrapassam uma determinado limiar, para cima ou para baixo, são transmitidas pela RSSF, a linha tracejada em vermelho representa o consumo de energia quando utilizado um limiar de $0,5^{\circ}\text{C}$, ou seja, temperaturas acima de $20,5^{\circ}\text{C}$ e abaixo de $19,5^{\circ}\text{C}$ são transmitidas pela rede. O consumo reduz conforme aumenta o limiar, pois este aumento além de reduzir a quantidade de dados transmitidos também aumenta o período em que cada sensor permanece em *Sleep*, conforme já visto no Cenário anterior.

Uma observação importante a ser feita é que quando o limiar é muito pequeno o consumo torna-se superior de quando usado um *time-slot* fixo, conforme comparação feita entre a linha contínua (*time-slot* em 10ms) e a linha pontilhada (limiar de $0,2^{\circ}\text{C}$). Desta forma, fixando a ideia de que o protocolo é ideal para sistema com pouca variação, mas que pode se tornar crítico em algum momento.

Figura 27: Representação gráfica da média aritmética de cinco simulações de um dos dez sensores de temperatura. O consumo de energia corresponde aos valores de rádio do CC2500 com 2.4GHz de frequência com microcontrolador MSP430 (INSTRUMENTS, 2009)



4.2.3 Simulação do cenário C

Acredita-se que as maiores catástrofes da natureza foram causadas por vulcões, que entraram para a história por sua grandeza, destruição ou mesmo pelos transtornos que provocaram na vida de milhões de pessoas. Estima-se que existam mais de 550 vulcões ativos na terra.

Entre as maiores erupções registradas destaca-se o Monte Tambora, na Indonésia. A erupção de 1815 é considerada o maior evento do gênero nos últimos dez mil anos e matou mais de 70 mil pessoas, seja pela ação direta da explosão ou por doenças e problemas subsequentes.

Na Itália, o Vesúvio que destruiu a cidade de Pompeia e Herculano, no ano de 79 d.C., foi consequência de uma fortíssima erupção vulcânica. Cerca de 16 mil pessoas morreram e o

acúmulo de lava e cinzas varreu as duas cidades do mapa. Foi apenas no século XVIII que escavações por acaso revelaram sua existência.

O maior vulcão europeu raramente adormece e a população que vive nas férteis terras que o contornam, em Catania, na Sicília, já se habituou a ver a montanha de 3330 metros de altitude expelir fumaça com frequência. A atividade do vulcão é praticamente incessante, mas a última erupção propriamente dita foi registrada em janeiro de 2011, com um derramamento de lava que durou 42 minutos.

A Figura 28 mostra as atividades vulcânicas da Ilha Gorgona. Os dados foram capturados em 11 de Fevereiro de 2015, pela rede sismográfica Seisan (<http://seisan.sgc.gov.co/RSNC>), que corresponde ao intervalo das 8:00 as 13:30 horas deste dia. Foram destacados com círculos três atividades vulcânicas significativas neste intervalo. A Figura 29 mostra o consumo de energia deste intervalo simulado, onde cada intervalo com aumento de consumo de energia corresponde a acontecimentos críticos, identificados pelos círculos na Figura 28.

Figura 28: Representação gráfica do monitoramento do vulcão Gorgona na Ilha Gorgona da Colômbia, pela Rede Sismográfica Nacional de Colombia (RSNC)

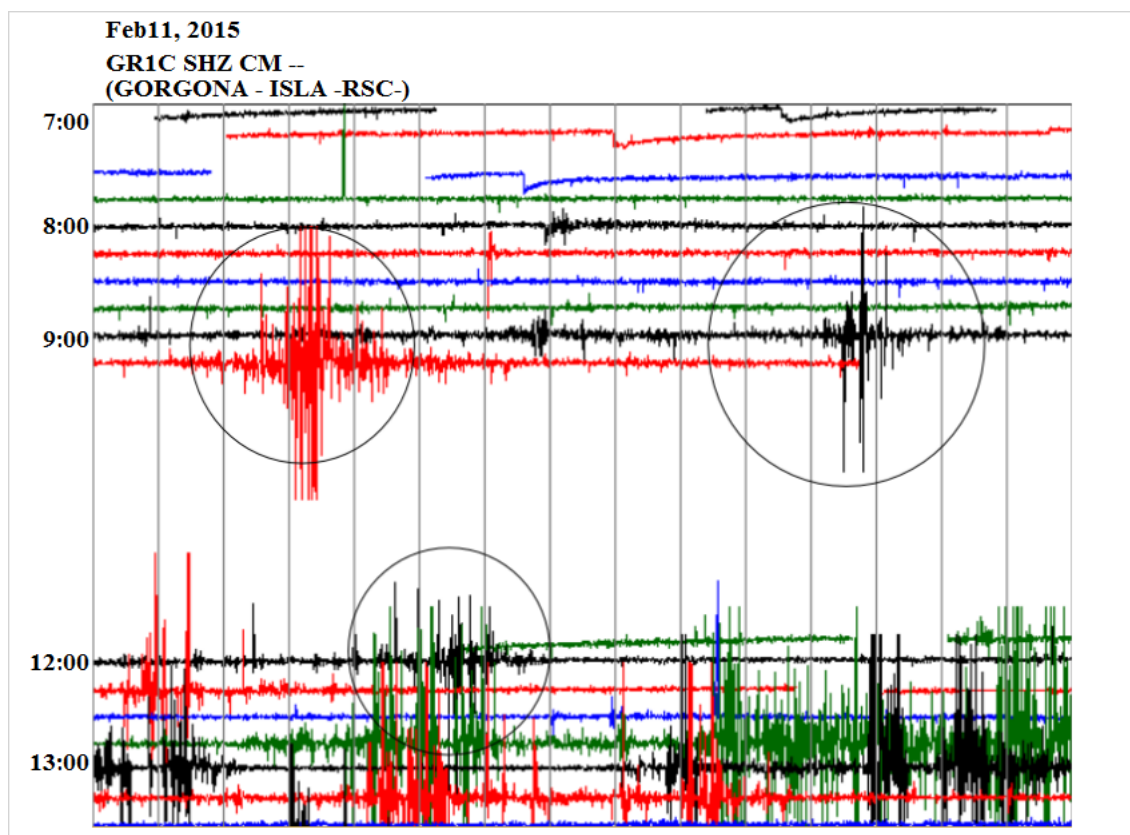
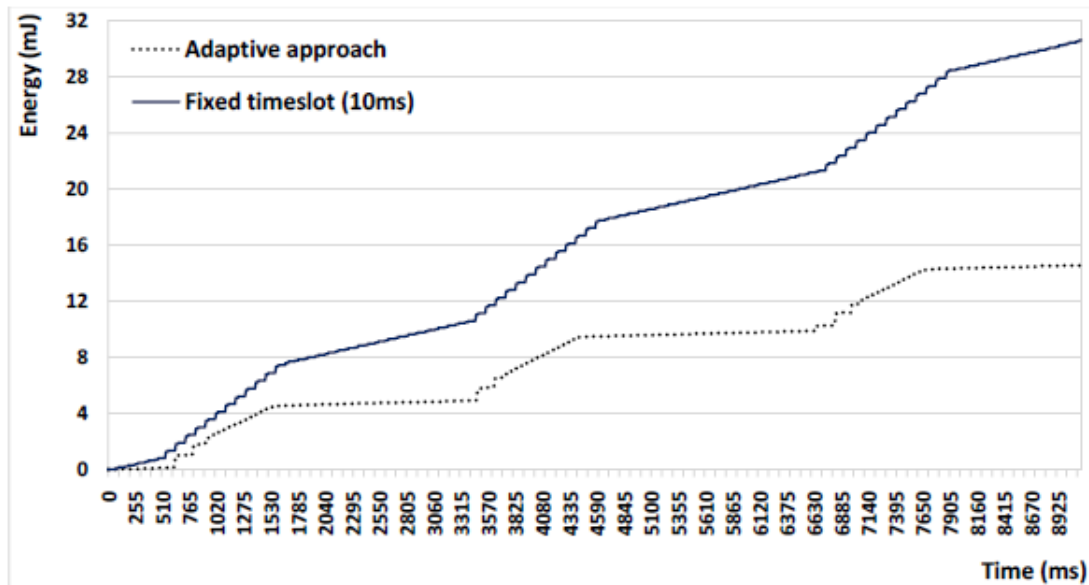


Figura 29: Apresenta o consumo de energia para uma simulação do intervalo sombreado da Figura 28. O consumo de energia corresponde aos valores do sensor TMote Sky com o rádio CC2420 operando a 2,4 GHz de rádio frequência com microprocessador MSP430F1611 (SKY, 2006)



4.2.4 Comparação de resultados

Tabela 8: Redução no consumo de energia quando aplicado um critério de seleção de dados, em relação ao TDMA clássico

Limiar	Redução
0,2	-16%
0,5	17%
0,7	33%
0,9	49%

Conforme Tabela 8, que representa os dados relacionados ao gráfico apresentado na Figura 28, percebe-se que quanto mais aumenta o limiar maior é a redução no consumo de energia, o que é uma conclusão bastante óbvia, pois o aumento do limiar corresponde a diminuição na quantidade de dados transmitido. Esta técnica, extremamente simples mas eficiente, tem sido utilizada por diversos autores, (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000) na implementação do LEACH, (XIE; WANG, 2008) na implementação de EC-TDMA e (CHO et al., 2005) na implementação de DEE-MAC.

Convém mencionar que existe um limite na redução do limiar, conforme apresentado na primeira linha da Tabela 8, ou seja, uma redução muito alta no limiar implica em aumento na quantidade de dados transmitidos, além disso causa um aumento na frequência de coleta, devido à redução do *time-slot*, fazendo com que exista um consumo extra relacionado à transição entre estados. Portanto, o uso de flexibilização no aumento do *time-slot* não é adequado para sistemas com uma carga muito elevada de transmissão de dados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Serão abordadas neste capítulo as considerações e conclusões do trabalho desenvolvido nessa dissertação, incluindo comentários sobre pesquisas futuras no assunto abordado.

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como proposta o desenvolvimento de um novo protocolo de acesso ao meio baseado em TDMA, objetivando o prolongamento da vida útil de uma RSSF e obtendo maior controlabilidade do ambiente monitorado através de uma melhor observabilidade, quando submetido a sistemas críticos. Além disso, foi desenvolvido um novo modelo energético para quantificar a eficiência do novo modelo de acesso ao meio.

O algoritmo proposto se mostrou eficiente no quesito minimização do consumo de energia, quando comparado ao TDMA clássico.

O modelo energético desenvolvido a partir das características do sensor de temperatura CC2500 demonstrou ser eficiente quando estendido para um caso mais genérico, pois o conjunto de máquinas de estados possibilita a generalização de muitos modelos de sensores com as características apresentadas na Figura 1.

Através deste novo protocolo é possível incrementar a observabilidade, quando o ambiente monitorado estiver em uma situação crítica, ou seja, quando as variáveis do ambiente sofrerem variações drásticas em um curto intervalo de tempo. Dessa forma, o protocolo proposto possibilita incrementar a controlabilidade do ambiente, ou seja, profissionais responsáveis por tal ambiente podem tomar medidas antecipadamente para diminuir ou evitar que danos sejam causados.

O protocolo proposto se aplica a todos os cenários em que as variações ambientais são pequenas por um longo período e de forma inesperada tais variações intensificam-se, como os listados no cenário A, B e C.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Observa-se atualmente uma grande tendência em se utilizar TDMA como protocolo de acesso ao meio em RSSF na resolução de problemas envolvendo otimização de consumo de energia, dessa forma, essa área se transformou em um campo muito fértil de pesquisa e desenvolvimento. Diretamente relacionado com o método proposto, a seguir será apresentada duas possíveis soluções diretamente relacionadas com o trabalho proposto.

- I) TDMA fixo com alocação dinâmica: Em algum momento inicial executa-se um algoritmo, que tem como objetivo avaliar qual o melhor tamanho de *time-slot* *SlotMin* e o número de *slots* do *frame*. Objetivando encontrar o tamanho de *slot* que atenda a maior taxa de sensoriamento para a dada aplicação, respeitando o número de sensores. A partir deste ponto, os *SlotMins* são apenas alocados para os sensores conforme sua taxa.
- II) TDMA fixo com sensoriamento dinâmico e fusão de dados: Os dados são fundidos segundo uma regra. Pode ter ou não perda de informação. Pode ter junto um *byte* de controle indicando se está ocorrendo muita variação. Por exemplo, supondo que uma quantidade de amostras tiveram o mesmo resultado. Ao invés de apenas mostrar o resultado da amostra, propaga-se uma informação dizendo que não há variação. Em consequência, o nodo central pode baixar a taxa de sensoriamento.

REFERÊNCIAS

- ABU-MAHFOUZ, A. M.; HANCKE, G. P. Ns-2 extension to simulate localization system in wireless sensor networks. In: IEEE. *AFRICON, 2011*. [S.l.], 2011. p. 1–7. Citado na página 27.
- AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. Citado na página 18.
- AMIRI, M. Measurements of energy consumption and execution time of different operations on tmote sky sensor nodes. Masarykova univerzita, 2010. Citado na página 40.
- BHATIA, A.; HANSDAH, R. A fast and fault-tolerant distributed algorithm for near-optimal tdma scheduling in wsns. In: IEEE. *Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 2014 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 294–301. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- BOHRER, V. et al. A flexible framework for modeling and simulation of multipurpose wireless networks. In: IEEE. *Rapid System Prototyping (RSP), 2013 International Symposium on*. [S.l.], 2013. p. 94–100. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 54.
- BOHRER, V. et al. Wines-a flexible framework for wireless network description and simulation. 2012. Citado na página 54.
- CHEN, F. et al. An energy model for simulation studies of wireless sensor networks using omnet++. *PIK-Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, v. 32, n. 2, p. 133–138, 2009. Citado na página 29.
- CHO, S. et al. Dynamic energy efficient tdma-based mac protocol for wireless sensor networks. In: IEEE. *Autonomic and Autonomous Systems and International Conference on Networking and Services, 2005. ICAS-ICNS 2005. Joint International Conference on*. [S.l.], 2005. p. 48–48. Citado 3 vezes nas páginas 31, 33 e 72.
- CHU, M.; HAUSSECKER, H.; ZHAO, F. Scalable information-driven sensor querying and routing for ad hoc heterogeneous sensor networks. *International Journal of High Performance Computing Applications*, SAGE Publications, v. 16, n. 3, p. 293–313, 2002. Citado na página 83.
- ELSON, J. et al. Emstar: An environment for developing wireless embedded systems software. *Center for Embedded Network Sensing*, 2003. Citado na página 27.
- ELSON, J.; GIROD, L.; ESTRIN, D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, ACM, v. 36, n. SI, p. 147–163, 2002. Citado na página 51.
- FARAHANI, S. *ZigBee wireless networks and transceivers*. [S.l.]: newnes, 2011. Citado na página 44.
- GANERIWAL, S.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, M. Network-wide time synchronization in sensor networks. *Center for Embedded Network Sensing*, 2003. Citado na página 52.

- HALGAMUGE, M. N. et al. An estimation of sensor energy consumption. *Progress In Electromagnetics Research B*, EMW Publishing. The Journal's web site is located at <http://www.jpier.org/PIERB/>, 2009. Citado na página 29.
- HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: IEEE. *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*. [S.l.], 2000. p. 10–pp. Citado 4 vezes nas páginas 30, 32, 72 e 84.
- HOESEL, L. V. et al. Advantages of a tdma based, energy-efficient, self-organizing mac protocol for wsns. In: IEEE. *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th*. [S.l.], 2004. v. 3, p. 1598–1602. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- INSTRUMENTS, T. *CC2500 low-cost low-power 2.4 ghz RF transceiver datasheet*. [S.l.]: May, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- INSTRUMENTS, T. ez430-rf2500 development tool user's guide. *Texas Instruments SLAU227E*, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 7, 68 e 70.
- INSTRUMENTS, T. Mixed signal microcontroller. *MSP430F22x2 and MSP430F22x4 datasheet, AUGUST*, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 37, 39, 40 e 61.
- INTANAGONWIWAT, C. et al. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, IEEE Press, v. 11, n. 1, p. 2–16, 2003. Citado na página 82.
- JAYAKUMAR, G.; GOPINATH, G. Ad hoc mobile wireless networks routing protocols—a review. *Journal of Computer science*, v. 3, n. 8, p. 574–582, 2007. Citado na página 85.
- JOHNSON, D. B.; MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: *Mobile computing*. [S.l.]: Springer, 1996. p. 153–181. Citado na página 85.
- KANZAKI, A. et al. Dynamic tdma slot assignment in ad hoc networks. In: IEEE. *Advanced Information Networking and Applications, 2003. AINA 2003. 17th International Conference on*. [S.l.], 2003. p. 330–335. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- KELLNER, S. et al. Towards a realistic energy model for wireless sensor networks. In: IEEE. *Wireless on Demand Network Systems and Services, 2008. WONS 2008. Fifth Annual Conference on*. [S.l.], 2008. p. 97–100. Citado na página 29.
- LEE, W. L.; DATTA, A.; CARDELL-OLIVER, R. Fleximac: A flexible tdma-based mac protocol for fault-tolerant and energy-efficient wireless sensor networks. In: IEEE. *Networks, 2006. ICON'06. 14th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. v. 2, p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- LIANG, O.; SEKERCIOGLU, Y. A.; MANI, N. A low-cost flooding algorithm for wireless sensor networks. In: IEEE. *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*. [S.l.], 2007. p. 3495–3500. Citado na página 82.

- LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. S. Pegasus: Power-efficient gathering in sensor information systems. In: IEEE. *Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 3, p. 3–1125. Citado na página 84.
- MA, J. et al. Energy efficient tdma sleep scheduling in wireless sensor networks. In: IEEE. *INFOCOM 2009, IEEE*. [S.l.], 2009. p. 630–638. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- MARGHESCU, C. et al. Simulation of a wireless sensor network using opnet. In: IEEE. *Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2011 IEEE 17th International Symposium for*. [S.l.], 2011. p. 249–252. Citado na página 26.
- MORALES, M.; SHIVERS, Z. Wireless sensor monitor using the ez430-rf2500. *Texas Instruments*, p. 15, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 37, 39 e 61.
- MOSCHITTA, A.; NERI, I. Power consumption assessment in wireless sensor networks. *ICT-Energy-Concepts Towards Zero-Power Information and Communication Technology*, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 37, 39 e 61.
- ODEY, A. J.; LI, D. Low power transceiver design parameters for wireless sensor networks. Scientific Research Publishing, 2012. Citado na página 31.
- PARK, S.; SAVVIDES, A.; SRIVASTAVA, M. B. Sensorsim: A simulation framework for sensor networks. In: ACM. *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. [S.l.], 2000. p. 104–111. Citado na página 26.
- PERKINS, C. E.; BHAGWAT, P. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers. In: ACM. *ACM SIGCOMM computer communication review*. [S.l.], 1994. v. 24, n. 4, p. 234–244. Citado na página 85.
- RASTEGARNIA, A.; SOLOUK, V. Performance evaluation of castalia wireless sensor network simulator. In: IEEE. *Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2011 34th International Conference on*. [S.l.], 2011. p. 111–115. Citado na página 26.
- REHENA, Z. et al. Spin implementation in tinyos environment using nesc. In: IEEE. *Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2010 International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 1–6. Citado na página 82.
- SAYADI, A.; MAHFOUDH, S.; LAOUITI, A. Sensor-ostr: Novel energy-efficient dynamic tdma frame size-based mac protocol for wireless multi-hop sensor networks. In: IEEE. *Wireless Days (WD), 2012 IFIP*. [S.l.], 2012. p. 1–3. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.
- SCHURGERS, C.; SRIVASTAVA, M. B. Energy efficient routing in wireless sensor networks. In: IEEE. *Military Communications Conference, 2001. MILCOM 2001. Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force. IEEE*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 357–361. Citado na página 83.
- SHAH, R. C.; RABAEY, J. M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks. In: IEEE. *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 350–355. Citado na página 83.

SKY, T. *Ultra low power IEEE 802.15. 4 compliant wireless sensor module*. [S.l.]: Datasheet, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 72.

SOBEIH, A. et al. J-sim: A simulation environment for wireless sensor networks. In: IEEE COMPUTER SOCIETY. *Proceedings of the 38th annual Symposium on Simulation*. [S.l.], 2005. p. 175–187. Citado na página 27.

SOBEIH, A. et al. J-sim: a simulation and emulation environment for wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 104–119, 2006. Citado na página 27.

SUNDARARAMAN, B.; BUY, U.; KSHEMKALYANI, A. D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 281–323, 2005. Citado na página 51.

VARGA, A. et al. The omnet++ discrete event simulation system. In: SN. *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*. [S.l.], 2001. v. 9, n. S 185, p. 65. Citado na página 26.

WANG, Q.; BALASINGHAM, I. *Wireless sensor networks-an introduction*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2010. Citado na página 22.

WANG, Q.; YANG, W. Energy consumption model for power management in wireless sensor networks. In: IEEE. *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON'07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference on*. [S.l.], 2007. p. 142–151. Citado na página 29.

WANG, Y. et al. D-tdma: An approach of dynamic tdma scheduling for target tracking in wireless sensor networks. In: IEEE. *Green Computing and Communications (GreenCom), 2010 IEEE/ACM Int'l Conference on & Int'l Conference on Cyber, Physical and Social Computing (CPSSCom)*. [S.l.], 2010. p. 546–553. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

XIE, M.; WANG, X. An energy-efficient tdma protocol for clustered wireless sensor networks. In: IEEE. *Computing, Communication, Control, and Management, 2008. CCCM'08. ISECS International Colloquium on*. [S.l.], 2008. v. 2, p. 547–551. Citado 3 vezes nas páginas 31, 33 e 72.

XU, Y.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In: ACM. *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*. [S.l.], 2001. p. 70–84. Citado na página 84.

YAO, Y.; GEHRKE, J. The cougar approach to in-network query processing in sensor networks. *ACM Sigmod Record*, ACM, v. 31, n. 3, p. 9–18, 2002. Citado na página 83.

YE, W.; HEIDEMANN, J.; ESTRIN, D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, IEEE, v. 12, n. 3, p. 493–506, 2004. Citado na página 30.

ZANAJ, E.; BALDI, M.; CHIARALUCE, F. Efficiency of the gossip algorithm for wireless sensor networks. In: IEEE. *Software, Telecommunications and Computer Networks, 2007. SoftCOM 2007. 15th International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 1–5. Citado na página 82.

ZHOU, H.-Y. et al. Modeling of node energy consumption for wireless sensor networks. *Wireless Sensor Network*, Scientific Research Publishing, v. 3, n. 01, p. 18, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

Anexos

Anexo A – Protocolos de roteamento para RSSF

A comunicação de rádio frequência (transmitir e receber dados) é responsável por grande parte da energia consumida em uma RSSF. O protocolo de roteamento é responsável por determinar a forma como os dados são transmitidos através da rede até uma BS. Portanto, garantir a eficiência do protocolo de roteamento é extremamente importante para minimizar o consumo de energia. Neste trabalho, não será implementado tal protocolo. Entretanto, a técnica de acesso ao meio implementada neste trabalho pode ser utilizada juntamente com qualquer protocolo de roteamento. Nos próximos tópicos serão apresentados alguns protocolos de roteamento com suas características específicas.

A.1 Baseado em dados

Neste tipo de roteamento cada nodo sensor transmite informações diretamente ao coletor, sendo que este pode enviar uma solicitação de consulta a uma determinada região, e aguardar que sensores daquela região respondam. Este tipo de sistema de roteamento é ótimo para redes com densidade elevada de sensores, onde a identificação de cada sensor se torna inviável.

Dentre os principais algoritmos de roteamento baseados em dados, pode-se destacar:

- I) **Flooding** (LIANG; SEKERCIOGLU; MANI, 2007), neste algoritmo os nodos sensores enviam seus dados aos seus vizinhos que por sua vez encaminham adiante até o processo alcançar o coletor;
- II) **Gossiping** (ZANAJ; BALDI; CHIARALUCE, 2007) trata-se de uma versão melhorada de **Flooding**, a única diferença é que o sensor envia o pacote para um vizinho de forma aleatória;
- III) **Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN)** (REHENA et al., 2010), neste protocolo uma mensagem é enviada aos nodos sensor vizinhos que possuem informações a serem transmitidas, estes vizinhos que desejam receber informações devem se pronunciar. Para tal, este protocolo utiliza três tipos de mensagens: i) *Advertisement packet (ADV) sensor*, adverte os demais sensores que têm dados a transmitir; ii) *Request (REQ) sensor*, quem está interessado em receber dados envia esta mensagem; iii) *DATA*, esta mensagem contém o pacote de dados a ser transmitido;
- IV) **Directed Diusion (DD)** (INTANAGONWIWAT et al., 2003) trata-se de um protocolo que utiliza a difusão de dados através dos nos sensores. Para evitar operações desnecessárias na camada de rede, e assim reduzir a dissipação de energia, este protocolo cria atributos,

tais como nome dos objetos, área geográfica duração e intervalo, a serem distribuídos com informações aos sensores interessados;

- V) **Roteamento com reconhecimento de Energia** consiste em um sistema de roteamento com caminho pré-selecionado, onde os caminhos são escolhidos por uma função de probabilidade que leva em consideração o consumo de potência do caminho (SHAH; RABAEY, 2002);
- VI) **Roteamento baseado em Gradiente** trata-se de um protocolo baseado em DD apresentado por (SCHURGERS; SRIVASTAVA, 2001). A ideia principal neste protocolo é reduzir o número de saltos para cada transmissão, assim cada nodo sensor descobre o número mínimo de saltos até o coletor. Para manter o tráfego na rede uniformemente equilibrada, faz-se uso de três técnicas de agregação de dados e de disseminação: Regime estocástico, quando tiver mais de um salto considerado mais próximo com o mesmo gradiente, o nodo sensor escolhe um deles de forma aleatória. Regime baseado em energia, quando a energia de um sensor cai abaixo de certo limiar, outros nodos sensores são desencorajados a enviarem dados para este sensor. Regime baseado em fluxo, nodos sensores que fazem parte de um fluxo são fortemente desencorajados a participarem de um novo fluxo;
- VII) **Constrained Anisotropic Diffusion Routing (CADR)** foi apresentado por (CHU; HAUSSECKER; ZHAO, 2002) e trata-se de um protocolo que tem como base o DD. Neste protocolo apresentam-se duas técnicas, uma voltada para consultar informações dos nodos sensores e outra que consiste em fazer roteamento através de difusão anisotrópica, utilizada para eliminar ruídos;
- VIII) **COUGAR**, proposta por (YAO; GEHRKE, 2002) faz uso do conceito de banco de dados distribuído como forma de enxergar a rede. Neste protocolo uma nova arquitetura é apresentada para o sistema de banco de dados do nodo, onde sensores selecionam um líder, o qual realizará agregações e transmissões de dados ao coletor.

A.2 Baseado em roteamento hierárquico

Este tipo de protocolo tem por objetivo manter um gasto de energia eficiente nos sensores, através de comunicação *mult-hop* dentro de um *cluster*. Além disso, o roteamento hierárquico realiza agregação e fusão de dados com o objetivo de diminuir o número de mensagens transmitidas ao coletor e conseqüentemente, é capaz de reduzir o consumo de energia. Destacam-se nessa categoria os seguintes protocolos:

- I) **LEACH** trata-se de um dos mais populares algoritmos de roteamento hierárquico para redes de sensores sem fio baseado em formação de *clusters* apresentado por (HEINZELMAN;

CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), cada *cluster* local elege um CH que serve para receber dados de todos os demais nodos daquele *cluster*, o nodo sensor CH realiza funções de processamento dos dados, tais como agregação e os transmite a uma estação base remota, neste algoritmo é utilizado TDMA como protocolo de acesso ao meio;

- II) **Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)**, é um protocolo baseado em **LEACH**, porém ao invés de formar *clusters* como **LEACH**, **PEGASIS** forma cadeias de sensores de tal forma que cada sensor transmite e recebe de um vizinho, e apenas um nodo sensor desta cadeia transmite ao coletor. Este protocolo foi proposto por (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002);

A.3 Baseados em localização

Em alguns protocolos de roteamento a localização de cada sensor pode auxiliar na redução do consumo de energia, eliminar redundância de informações quando existem muitos nodos sensor na mesma área geográfica, além disso, muitas redes são compostas por sensores em movimento, tais como sobre os oceanos, rebanho de gado ou qualquer espécie de animais em monitoramento. A seguir serão apresentados os dois principais protocolos baseados em localização:

- I) **Minimum Energy Communication Network (MECN)**, proposto por (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001), este protocolo faz uso de *Global Positioning System* (GPS) e considera que a rede é móvel, um dos nodos sensor é considerado mestre. Vários sensores criam uma região de transmissor que geralmente é circular, de tal forma que a transmissão é feita pelo sensor que tem a maior eficiência energética;
- II) **Geographic Adaptive Fidelity (GAF)** (XU; HEIDEMANN; ESTRIN, 2001), este protocolo faz economia de energia através do desligamento dos nodos sensores que não estão sendo utilizados na rede durante uma determinada observação. Através da localização por GPS este protocolo cria um *grid* virtual para as áreas de cobertura. Os sensores com mesma posição geográfica são considerados mesmo custo energético e pode ser utilizado para deixar nodos dormindo, dessa forma economizando energia.

A.4 Baseado em roteamento proativos

Esta classe de protocolos é altamente recomendada a sistemas de tempo real, uma vez que sempre mantêm rotas bem definidas. Entretanto, esse tipo de protocolo não é recomendado para sistemas com alta taxa de mobilidade e com grande número de sensores, pois suas tabelas

de roteamento atingem grandes dimensões. Destacam-se como os principais protocolos dessa classe:

- I) **Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)** (PERKINS; BHAGWAT, 1994), baseia-se no algoritmo de *Bellman-Ford*, que realiza buscas na rede através dos seguintes compôs em uma tabela: Endereço de destino, número de saltos necessários para alcançar o destino, um identificador para diferenciar cada rota na tabela. Sempre que ocorrer alguma atualização na rede, uma mensagem percorre a rede e a tabela de cada nodo sensor é atualizada;
- II) **Clusterhead Switching Routing (CGSR)** (JAYAKUMAR; GOPINATH, 2007), da mesma forma que os protocolos hierárquicos fazem uso do conceito de *clusters* para realizar segmentação da rede. Neste protocolo os pacotes dos nodos sensor são encaminhados aos seus CH, que por sua vez encaminha ao coletor. Cada sensor da rede possui duas tabelas para realizar o roteamento, uma que contém o endereço dos CH e outra quem contém o próximo passo para alcançar do destino.

A.5 Baseado em roteamento reativo

Trata-se de protocolos que criam suas rotas, através de *flooding*, somente quando o sensor deseja enviar seus dados ao coletor, não é aconselhável para sistemas que necessitam de alta velocidade, pois o cálculo de rota faz com que a transmissão dos dados seja lenta. Destaca-se como principal protocolo o sistema de roteamento dinâmico, do inglês *Dynamic Source Routing* (DSR). Nesse protocolo a descoberta da rota é feita em duas fases, sendo que na primeira fase, quando um sensor quer enviar um dado, o mesmo realiza uma consulta na tabela para saber se existe uma rota válida até o destino. Se existir o sensor faz uso dessa rota, mas se a rota não existir, inicia-se um processo de descoberta de rota enviando uma mensagem com uma chave de identificação única. Quando os demais nodos recebem esta mensagem, os mesmos verificam se em suas tabelas a rota é conhecida. Caso não seja conhecida, o nodo acrescenta a mesma em sua tabela e encaminha mensagem aos seus vizinhos (JOHNSON; MALTZ, 1996).

Na segunda fase, a manutenção da rota é realizada. Para isso, utilizam-se pacotes de erros para quando ocorrer erros fatais de transmissão, bem como utilizam-se pacotes de reconhecimento a fim de verificar se as rotas estão ativas.

Anexo B – Características essenciais em RSSFs

São muitas as áreas que RSSFs podem ser aplicadas. Dependendo da aplicação algumas técnicas como, tolerância a falhas, autenticidade, confidencialidade, integridade, escalabilidade e baixo consumo de energia devem ser consideradas, neste trabalho será dado maior importância para o baixo consumo de energia. Os sub-tópicos a seguir tem como objetivo auxiliar quando se deve usar essas técnicas.

B.1 Tolerância a falhas

RSSFs são compostas por milhares de nodos sensores o que, por sua vez, gera a necessidade de que os mesmos tenham uma área reduzida e baixo custo. Consequentemente, essas características acabam não contribuindo para a confiabilidade dos mesmos. Desta forma mecanismos devem ser implementados para fazer com que a rede seja tolerante a falhas. As falhas mais comuns são normalmente originadas por, falta de energia, algum dano físico ou falta de visibilidade de um nodo. Note que mesmo com perdas de alguns nodos, a rede deve ser capaz de realizar suas tarefas.

B.2 Autenticidade

Trata-se de um requisito muito importante em RSSFs, pois uma mensagem pode ser facilmente injetada maliciosamente no sistema. Assim, o receptor precisa assegurar que os dados utilizados em qualquer processo tenham como origem uma fonte confiável. A autenticação permite que o nodo sensor emissor e receptor tenha a certeza de que dados são realmente o que devem ser.

B.3 Confidencialidade

Garantia de que os dados enviados e que trafegam na rede não serão interpretados por pessoas ou sistemas não autorizados. Uma das técnicas mais utilizadas para garantir a confidencialidade é através do envio de mensagens pelo canal da rede de forma “encriptada”, o nodo sensor receptor deve ter mecanismos para “decriptar” mensagens.

B.4 Integridade

Integridade significa que os dados não devem ser modificados por alguém não autorizado. Se isso acontecer, então o receptor deve verificar se as informações recebidas são realmente as mesmas enviadas pelo remetente.

Trata-se de um requisito muito importante para qualquer tipo de aplicação, em RSSFs a ausência desse requisito pode levar a uma interpretação incorreta dos dados e consequentemente, a uma ação incorreta e/ou indesejada.

A violação da integridade pode ser dada por uma mensagem, que facilmente pode ser injetada no sistema de forma natural, como a interferência eletromagnética ou de forma intencional, como interferência humana. Esta interferência pode ter como objetivos danificar ou até mesmo roubar informações do sistema.

B.5 Escalabilidade

O baixo custo e o tamanho minimizado dos nodos-sensores contribuem para formação de redes densas e de alta escalabilidade. Redes densas certamente terão um alto grau de redundância e elevada quantidade dos dados o que, pode eventualmente ser visto como um problema. A ordem de grandeza associada ao número de nodos de uma RSSF pode variar de centenas até milhares.

Todavia, um sistema deve ser capaz de lidar com elevado número de nodos. Um sistema escalável deve garantir que a inclusão de um novo sensor não seja uma atividade complexa, bem como não gere uma sobrecarga à comunicação.

B.6 Reduzido consumo de energia

Nodos de RSSFs são dispositivos com dimensões bastante reduzidas e consequentemente, possuem uma bateria pequena. Assim, torna-se fundamental que os mesmos cooperem entre si a fim de garantir o transporte dos dados coletados devem cooperar entre si de modo a transportar as informações coletadas com a mínima energia. Nesse tipo de rede, a maior fonte de consumo de energia está associada à comunicação entre os nodos. Assim, torna-se essencial que algoritmos capazes de manter um minimizarem o consumo de energia associada ao tratamento de um determinado dado sejam adotados.