

*Controle de Acesso ao Meio (MAC) Baseado em  
Polling Hierárquico para Rede Corporal de  
Sensores sem Fio*

**Fernando Di Gianni**

Junho / 2015

Dissertação de Mestrado em Ciência da  
Computação

# **Controle de Acesso ao Meio (MAC) Baseado em *Polling* Hierárquico para Rede Corporal de Sensores sem Fio**

Esse documento corresponde à dissertação de mestrado apresentada à Banca Examinadora para Defesa no curso de Mestrado em Ciência da Computação da Faculdade Campo Limpo Paulista.

Campo Limpo Paulista, 12 de Junho de 2015.

Fernando Di Gianni

Prof. Dr. Shusaburo Motoyama  
Orientador

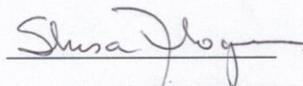
Faculdade Campo Limpo Paulista  
Programa de Mestrado em Ciência da Computação

*"Controle de Acesso ao Meio (MAC) Baseado em Polling Hierárquico para Rede Corporal de Sensores sem Fio"*

FERNANDO DI GIANNI

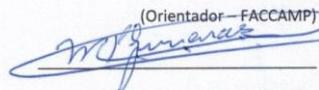
Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Mestrado em Ciência da Computação da Faculdade Campo Limpo Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Membros da Banca:



Prof. Dr. Shusaburo Motoyama

(Orientador – FACCAMP)



Prof. Dr. Marcelo de Paiva Guimarães

(FACCAMP)



Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

(UNICAMP)

Campo Limpo Paulista, 12 de junho de 2015.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Câmara Brasileira do Livro, São Paulo, Brasil

Di Gianni, Fernando

Controle de acesso ao meio (MAC) baseado em *polling* hierárquico para rede corporal de sensores sem fio / Fernando Di Gianni. Campo Limpo Paulista, SP: FACCAMP, 2015.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Shusaburo Motoyama  
Dissertação (mestrado) – Faculdade Campo Limpo Paulista – FACCAMP.

1. *Polling*. 2. Simulador computacional. 3. Rede corporal de sensores sem fio. I. Motoyama, Shusaburo. II. Faculdade Campo Limpo Paulista. III. Título.

CDD-629.892

## **Agradecimentos**

Em especial ao apoio inigualável do meu orientador o Prof. Dr. Shusaburo Motoyama, pelo incentivo à realização dessa dissertação, com sua imensa dedicação, boa vontade, paciência, vasto conhecimento e sabedoria.

Ao coordenador do curso Prof. Dr. Osvaldo Luiz de Oliveira pelo seu incentivo, apoio e por estar sempre à ordem, trazendo luz para dirimir as adversidades ocorridas no decorrer desse trabalho.

Aos professores Dr. Eduardo Javier Huerta Yero da Faccamp e Charles Bruno G. Barros da Etec de Praia Grande pelas brilhantes aulas de Java, onde pude aprofundar meus conhecimentos e aplicar no simulador computacional.

Aos colegas, professores e funcionários do programa de mestrado em Ciência da Computação da Faccamp, onde encontrei pessoas sábias com quem houve a possibilidade de estudar, pesquisar e discutir os temas e assuntos, fazendo com que apropriasse novos conhecimentos.

Aos colegas de trabalho no Centro Paula Souza que me incentivaram nessa jornada.

Ao exemplo de dedicação aos estudos acadêmicos dados pela minha esposa, filha e filho que foram fontes de inspiração para mim, além do amor e apoio incondicional dado por eles, por acreditar que eu pudesse obter o título de Mestre.

**Resumo.** O projeto de um esquema de acesso, MAC (*Medium Access Control*), para coletar os dados dos sensores é um dos pontos essenciais para operar uma rede corporal de sensores sem fios, WBAN (*Wireless Body Area Network*), de modo eficiente com economia de energia. O objetivo desta dissertação é estudar um MAC cuja estrutura seja baseada em hierarquia dos coletores de dados. No nível mais baixo, os sensores são divididos em grupos e existe um coletor para cada grupo. Cada um desses coletores, denominado de nó *sink* ou monitor controla o envio dos dados de um grupo de sensores, baseado em uma técnica denominada de *polling*. Essa divisão de sensores em grupos permite que os nós monitores, colocados estrategicamente em um cinto de um corpo humano, consigam uma melhor comunicação com os sensores, minimizando o problema de sombreamento (*shadow*) que deve ocorrer em frequência com pessoas em movimento. No segundo nível ou superiores, é colocado o nó mestre denominado *master* que deverá coletar os dados dos nós monitores e depois enviar à Internet ou ao servidor para manipulação e apresentação desses dados ao médico. Nesta dissertação, é feito o estudo de desempenho do esquema de acesso com estrutura hierárquica através da simulação. Os parâmetros de desempenho utilizados são os tempos médios de transferência e de ciclo. Inicialmente, os resultados obtidos pela simulação são comparados com os teóricos que utilizam modelos aproximados de análise. As comparações mostram que os resultados teóricos são boas aproximações, mas mostram, também, que o segundo nível da hierarquia é muito dependente da carga do primeiro nível. Para resolver esse problema, é proposta a utilização de taxas de transmissões diferentes para cada nível de hierarquia. Os resultados obtidos teoricamente e por simulação mostram que com uma escolha adequada de taxa de transmissão no segundo nível, podem-se manter os tempos de transferência e de ciclo dentro de valores razoáveis.

**Abstract:** *The design of medium access control (MAC) to transmit the data collected from the sensors is one of the essential points to operate a wireless body area network, WBAN, efficiently with energy saving. The objective of this dissertation is to study a MAC structure based on hierarchy of data collectors. At the lowest level, the sensors are divide into groups and there is a collector for each group. Each of these collectors, called the sink node or monitor, controls the sending of data from a group of sensors based on a technique called polling. This division into groups of sensors allows the monitor nodes, strategically placed in a belt of a human body, to have a better communication with the sensors, minimizing the shadow problem that should occur often in moving people. At the second level or higher are placed master nodes that collect the data from sink nodes and then send to Internet or server for handling and presentation of such data to the physician. In this dissertation, the performance study of the access scheme based on hierarchical structure through simulation is carried out. The used performance parameters are average transfer and cycle times. Initially, the results obtained by the simulation are compared to the results obtained by an approximate theoretical model. The comparisons show that the theoretical results are good approaches, but also show that the second level of the hierarchy is very dependent on the load of the first level. To solve this problem, it is proposed to use different transmission rates for each level of hierarchy. The theoretical and simulation results show that a suitable choice of transmission rate in the second level, the average transfer and cycle times can be kept within reasonable values.*

## SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
2.	Rede Corporal.....	4
2.1.	Telemedicina e WBAN.....	5
2.2.	Estrutura e Requisitos da WBAN .....	6
2.2.1.	Tipos de Dispositivos .....	6
2.2.2.	Taxas de Transmissão de Dados .....	7
2.2.3.	Uso de Energia.....	8
2.2.4.	Qualidade de Serviços .....	9
2.2.5.	Segurança.....	10
2.3.	Contexto da WBAN.....	10
2.4.	Camada Física.....	12
2.4.1.	Modelo do Canal.....	12
2.4.2.	Transmissão por Rádio Frequência .....	13
2.4.3.	Projeto da Antena .....	15
2.5.	Conclusão .....	15
3.	Mecanismos de Controle de Acesso (MAC) para Redes Corporais.....	17
3.1.	Especificações gerais MAC da WBAN .....	17
3.1.1.	Topologia de rede.....	17
3.1.2.	Modelo de referência.....	18
3.1.3.	Formato do quadro MAC .....	19
3.1.4.	Especificação da camada PHY.....	20
3.1.5.	Especificação do escalonamento.....	21
3.2.	Protocolos MAC Específicos para WBAN.....	22

3.3. QoS na WBAN .....	23
3.4. <i>Polling</i> na WBAN.....	25
3.5. Esquema Hierárquico.....	26
3.6. Conclusão .....	27
4. Análise de Desempenho do <i>Polling</i> Hierárquico .....	28
4.1. <i>Polling</i> Hierárquico .....	28
4.2. Modelagem de <i>Polling</i> Hierárquico .....	30
4.3. Modelo Teórico .....	32
4.3.1. Modelo Teórico Primeiro Nível .....	32
4.3.2. Modelo Teórico Segundo Nível .....	33
4.4. Descrição do Simulador.....	34
4.4.1. Visão geral do simulador.....	36
4.4.2. Funcionamento do Simulador.....	37
4.5. Análise de Resultados.....	41
4.6. Taxa de Transmissão Diferente no Segundo Nível .....	45
5. Conclusão .....	56
Referências .....	57
Apêndice A - Simulador Computacional.....	60
Anexo I. - Publicações da dissertação .....	64

## Glossário

ACK – *Acknowledgement* é a confirmação de recebimento dos dados.

Ad Hoc – Rede de dados onde a comunicação é realizada entre os nós de forma direta, sem controle centralizado no envio de mensagens.

Antena dipolo – Sistema de captação e transmissão de RF composto de duas cargas elétricas de sinais opostos, separadas por uma pequena distância.

Antena *loop* – Sistema de captação e transmissão de RF constituído por dois polos magnéticos iguais, mas de sinais opostos, separados por uma pequena distância.

*Beacon* – Parte do *superframe* com dados de gerenciamento. Responsável por permitir que estações estabeleçam e mantenham conexão entre os dispositivos.

B-MAC – Um protocolo MAC configurável para RSSFs.

BAN-MAC – Um protocolo MAC para comunicações confiáveis em redes corporais.

BodyQoS – Protocolo de priorização de tráfego em uma rede corporal que inclui: controle de admissão com base em prioridades, agendamento de recursos sem fio e disponibilização de largura de banda efetiva.

dB – Decibéis. Unidade de medida sonora.

DQBAN – *Distributed queuing body area network*. Uma rede corporal de enfileiramento distribuído que usa a lógica fuzzy para melhorar a eficiência energética em WBSNs.

ECG – Eletrocardiograma. Exame que registra da variação dos potenciais elétricos gerados pela atividade elétrica do coração.

EEG – Eletroencefalograma. É um exame que analisa a atividade elétrica cerebral espontânea, captada através da utilização de eletrodos colocados sobre o couro cabeludo

EMG – Eletromiograma. É uma técnica de monitoramento da atividade elétrica das membranas das células musculares, medidas pelas diferenças de potenciais de deflagrados pela ação de movimentos.

ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*. Instituto europeu de padrões de telecomunicações.

*Frame* - Sequência de octetos ininterruptos entregues pela camada MAC para a camada física PHY ou vice-versa sem um nó sensor ou um concentrador.

FCC – *Federal Communications Commission*. Comissão Federal Norte Americana de Comunicações.

FCS – *Frame Check Sequence*. Refere-se ao código de detecção de erro extra adicionado a um quadro em um protocolo de comunicações.

H-MAC – *Hybrid MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*. Neste protocolo tempo é dividido em grandes quadros onde cada quadro tem duas partes: uma parte ativa (em tempo) e uma parte que dorme.

HME – *Hub Management Entity*. Entidade gerenciadora do hub.

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*.

Lógica Fuzzy – Uma ampliação da lógica booleana que utiliza valores lógicos intermediários entre o falso (0) e o verdadeiro (1).

LPL – *Low-power Listening*. Sistema de escuta com baixo consumo de energia.

LOS – *Line of Sight*. Linha de visada.

MAC – *Medium Access Control*. Controle de acesso ao meio.

MIC – *Message Integrity Code*. É um pequeno pedaço de informação utilizado para autenticar uma mensagem e para fornecer integridade e autenticidade garantida sobre a mensagem.

*Node* - Entidade que contém uma camada MAC, uma camada PHY e opcionalmente fornece serviços de segurança.

$\mu\text{W}$  – *micro Watt*. Submúltiplo da unidade de medida de potência Watt (W).  $1 \mu\text{W}$  equivale a  $1 \text{ W} \times 10^{-6}$ .

NLOS – *Non Line of Sight*. Sem linha de visada. Arranjo de sensores corporais sem fio que não estão em uma linha livre de obstáculos para a transmissão de dados.

NME – Node Management Entity. Entidade de gerenciamento de um nó de uma rede.

PHY – *Physical Layer*. Camada física de uma rede.

PLCP – *Physical Layer Convergence Protocol*. É um protocolo para várias redes de transmissão de dados da camada física.

PPDU – *Physical-Layer Service Data Unit*. É o formato de pacotes da camada física.

PSDU – *Physical-Layer Protocol Data Unit*. É o formato de saída de pacotes. Descreve um bloco de dados que é transmitido entre duas instâncias da mesma camada física.

QoS – *Quality of Service*. Serviço de controle de qualidade para tráfego de dados em uma rede.

RF – Rádio Frequência.

RSSF – Rede de Sensores Sem Fio.

Rx – Recebe dados.

Tx – Transmite dados.

SAR – *Specific Absorption Rate*. Taxa de absorção específica.

SCP-MAC – É um novo protocolo MAC para redes de sensores sem fios, que permite ciclos de trabalho ultrabaixos.

*Sink* – Nó concentrador de informações dos sensores

*Slot* – Parte de um protocolo ou compartimento para colocação de dados.

S-MAC – Um protocolo de eficiência energética MAC para Redes de Sensores sem Fio.

*Superframe* – Estrutura de quadros contendo *slots* de dados. Com tamanho de tempo entre sinalizações (*Beacon*) na rede.

TDMA – *Time Division Multiple Access*. Acesso múltiplo por divisão de tempo

Tg – Tempo de Guarda.

T-MAC – Um protocolo de controle de acesso ao meio baseado em contenção para redes de sensores sem fio.

TRAMA - *TRaffic-Adaptive Medium Access*. É protocolo auto-adaptável às mudanças no tráfego, estado do nó, ou conectividade.

UWB – *Ultra Wide Band*. Banda ultra larga.

WBAN – *Wireless Body Area Network*. Rede sem fio corporal.

WBSN – *Wireless Body Sensor Network*. Rede corporal de sensores sem fio.

WiseMAC – É um novo protocolo de controle de acesso ao meio visando eficiência energética baseado em amostragem de preâmbulo sincronizado.

WLAN – *Wireless Local Area Network*. Rede de área local sem-fio.

WPAN – *Wireless Personal Area Network*. Rede sem fio pessoal.

WMAN – *Wireless Metropolitan Area Network*. Redes Metropolitanas Sem Fio. Esse escopo se refere a redes metropolitanas: redes de uso corporativo que atravessam cidades e estados.

WWAN - *Wireless Wide Area Network*. Rede de longa distância sem fio. É uma tecnologia que principalmente as operadoras de celulares utilizam para criar a sua rede de transmissão (CDMA, GSM, etc).

WSN – *Wireless Sensor Network*. Rede de sensores sem fio.

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1. Comparação WSN x WBAN .....	4
Tabela 2. Exemplos de Aplicação de WBAN na Área Médica .....	8
Tabela 3. Parâmetros para o segundo nível .....	46

## Lista de Figuras

Figura 1. Monitoramento de paciente na WBAN (Latré et al. 2010) .....	6
Figura 2. Comunicação intra-body e extra-body na WBAN (Latré et al. 2010) .	11
Figura 3. WBAN em relação a outras redes (Latré et al. 2010) .....	11
Figura 4. Topologia de Rede (IEEE 2012) .....	18
Figura 5. Modelo de Referência (IEEE 2012) .....	18
Figura 6. Formato do Quadro MAC (IEEE 2012) .....	19
Figura 7. Formato do Cabeçalho MAC (IEEE 2012) .....	19
Figura 8. Formato do corpo de um <i>Frame</i> MAC (IEEE 2012) .....	20
Figura 9. Estrutura Padrão do PPDU (IEEE 2012) .....	20
Figura 10. Estrutura de <i>frame</i> TDMA MAC (Yan et al. 2011) .....	24
Figura 11. Operação com <i>polling</i> flexível (Motoyama 2012) .....	26
Figura 12. Topologia hierárquica (Marinkovic et al. 2009) .....	26
Figura 13. Conceito de <i>polling</i> hierárquico aplicado ao corpo humano. ....	29
Figura 14. Modelo de <i>polling</i> hierárquico. ....	30
Figura 31. Modelo de desempenho para o segundo nível para buffer infinito. ....	33
Figura 15. Campos de texto para a entrada dos parâmetros. ....	34
Figura 16. Opção de tipo de gerador de pacotes.....	34
Figura 17. Campos para definição dos tempos nos níveis 1 e 2. ....	35
Figura 18. Opções de buffer, técnica de <i>polling</i> e intervalo de carga. ....	35
Figura 19. Opções de saídas do simulador. ....	35
Figura 20. Gráfico de tempo médio.....	36
Figura 21. Código fonte de criação das filas de pacotes para uma carga específica. .....	37
Figura 22. Código fonte para criação das filas dos pacotes.....	38

Figura 23. Código fonte para o consumo dos pacotes de acordo com o tempo de chegada. ....	39
Figura 24. Código fonte do modo exaustivo de consumo. ....	39
Figura 25. Código fonte do cálculo do tempo médio de espera e tempo médio do ciclo. ....	40
Figura 26. Código fonte do consumo dos pacotes no segundo nível.....	41
Figura 27. Tempo médio de transferência do pacote no primeiro nível. ....	42
Figura 28. Tempo médio do ciclo no primeiro nível. ....	43
Figura 29. Tempo médio de transferência do pacote no segundo nível. ....	44
Figura 30. Tempo médio do ciclo no segundo nível. ....	45
Figura 32. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 40 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.....	47
Figura 33. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 100 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.....	48
Figura 34. Comparação de desempenho entre 40 kbps e 100 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.....	49
Figura 35. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 250 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.....	50
Figura 36. Comparação de desempenho entre 100 kbps e 250 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.....	51
Figura 37. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 40 kbps para o tempo médio do ciclo de transmissão no segundo nível. ....	52
Figura 38. Comparação do desempenho entre 40 kbps e 100 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível. ....	52
Figura 39. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 100 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível. ....	53
Figura 40. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 250 kbps para o tempo médio do ciclo de transmissão no segundo nível. ....	54

Figura 41. Comparação do desempenho entre 100 kbps e 250 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível. ....	54
Figura 42. Visão geral do algoritmo desenvolvido para a análise do desempenho do esquema MAC baseado em <i>polling</i> hierárquico. ....	61
Figura 43. Visão geral da tela do simulador .....	62

## 1. Introdução

A contínua evolução da eletrônica, a sua miniaturização, os avanços na área de rede de computadores e o desenvolvimento de softwares eficientes possibilitaram a construção de sensores com uma variedade de funções embutidas e operando em rede. Essa rede é denominada de RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) ou em inglês WSN (*Wireless Sensor Network*). A WSN tem aplicações nas mais variadas áreas tais como na medicina, no controle de tráfego de uma cidade, no monitoramento de uma floresta ou em uma área considerada perigosa. Na área médica, uma das principais aplicações da WSN é no monitoramento do corpo humano. A WSN utilizada para essa finalidade é denominada de WBAN (*Wireless Body Area Network*) ou rede de área corporal sem fio (ou simplificada rede corporal), e objetiva não somente monitorar os sinais vitais do corpo humano, mas também aplicações em jogos eletrônicos onde os movimentos do corpo humano são captados e utilizados para interagir com o monitor de jogos.

Tanto a WSN como a WBAN necessitam de sensores de dimensões diminutas e altamente eficientes em termos de consumo de energia, pois são geralmente colocados em lugares de difíceis acessos e as baterias são difíceis de serem trocadas. No caso da WBAN, os sensores podem ser colocados externa ou internamente ao corpo humano ou podem ser colocados em vestes especiais. Neste último caso, as baterias serão mais fáceis de serem trocadas e o consumo de energia não será crítico. Outra característica que as diferencia é que os sensores na WBAN podem operar em meios de transmissão com bastante perda. Por exemplo, alguns modelos de sensores ao enviarem os dados podem utilizar o corpo humano como meio de transmissão. Os dados obtidos por uma WBAN são, principalmente, médicos, portanto, necessitam de confiabilidade e tratamento em tempo quase real. Os dados são privativos e confidenciais, necessitando de algum tipo de criptografia. Essas características da WBAN exigem estudos e novas propostas nos projetos de arquitetura de rede, nos controles de acesso ao meio, na manipulação de dados e no desenvolvimento de aplicativos essenciais.

O esquema de controle de acesso ao meio, MAC (*Medium Access Control*), para transmitir os dados coletados dos sensores, é um dos fatores essenciais para a WBAN operar de modo eficiente e com economia de energia. Existem várias propostas de esquemas de acesso para WBAN na literatura. Algumas propostas utilizam a técnica

TDMA (*Time Division Multiple Access*) com quadros longos de tempo (*superframe*) e um separador (*beacon*) que serve para diferenciar os quadros de tempo, e é utilizado, também, para sincronizar todos os sensores. O problema principal dessa abordagem é que os sensores devem estar sempre ativos nos inícios dos quadros para fins de sincronização, o que pode consumir energia. Entretanto, esta abordagem é objeto de padronização pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), com o padrão 802.15.6 (IEEE 2012), pois permite aplicação na área médica e, também, na área de entretenimento, por exemplo, em jogos que utilizam sensores colocados no corpo humano.

O padrão IEEE 802.15.6 (IEEE 2012) prevê, também, outra abordagem de acesso sem quadros longos e sem separador, utilizando a técnica *polling*. Essa abordagem será o objeto desse estudo.

O objetivo desta dissertação é estudar um MAC com escalonamento *polling*, cuja estrutura seja baseada em hierarquia de coletores de dados. No nível mais baixo, os sensores estão divididos em grupos onde existe um coletor para cada grupo. Cada um desses coletores, denominado de nó sorvedouro ou monitor controla o envio dos dados de um grupo de sensores, e utiliza a técnica *polling*. Essa divisão de sensores em grupos permite que vários nós monitores, colocados estrategicamente, por exemplo, em uma braçadeira ou em um cinto no corpo humano, consigam uma melhor comunicação com os sensores e minimizem o problema de sobreposição (*shadow*) que ocorre frequentemente com pessoas em movimento. No segundo nível, são colocados os nós *masters* que deverão coletar os dados dos nós monitores utilizando, também, a técnica de *polling* para depois enviar à Internet ou a um servidor para manipulação e apresentação desses dados aos profissionais da área de saúde.

No artigo apresentado por (Motoyama 2013), o esquema de acesso hierárquico foi estudado teoricamente utilizando um modelo de fonte de sensor baseado em uma saída poissoniana. O esquema de acesso hierárquico, nesta dissertação, será estudado através da simulação no computador para validação do modelo teórico e verificação do desempenho da rede com outros parâmetros diferentes daqueles utilizados em (Motoyama 2013), como por exemplo, a taxa de transmissão entre o sensor e o nó *sink* e entre o nó *sink* e o nó *master*.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O capítulo dois descreve as principais características das redes corporais, sua estruturação e especificação em camadas. No capítulo três, descrevem-se os principais modelos de acesso encontrados na literatura, características e diferenças entre um esquema e outro. No capítulo quatro, são apresentados o modelo de simulação do esquema de acesso baseado em estrutura hierárquica, os resultados da simulação, a comparação com o modelo teórico e a análise do esquema de acesso com diferentes frequências de transmissão. Finalmente, no capítulo cinco, são discutidos os principais resultados da dissertação.

## 2. Rede Corporal

As redes de sensores sem fio estão atualmente em grande expansão e uma das suas partes essenciais é aquela constituída por sensores. Os sensores são dispositivos capazes de coletar, processar e transmitir dados. Um tipo especial de sensor é o atuador que pode agir a partir de dados coletados. O atuador coleta e processa os dados e, se necessário, interfere no ambiente monitorado mudando suas características, inclusive podendo ter a capacidade de transmitir informações. Os dados coletados dos sensores ou atuadores podem ser transportados por diversos tipos de mídias como cabos óticos, cabos elétricos ou ondas de rádio.

O monitoramento ambiental de um lago pode ser realizado através de uma rede de sensores, onde são mensuradas diversas grandezas físicas como temperatura, pressão, acidez, entre outras. Como exemplo de uma rede com atuadores, o tráfego urbano de veículos pode ser aprimorado a partir das medidas de intensidade de veículos que circulam nas ruas. Nesse caso, os atuadores são capazes de modificar o tempo dos semáforos para melhorar o fluxo do trânsito (Thomazini et al. 2009).

A diminuição no tamanho dos sensores e atuadores contribuiu para o surgimento e aperfeiçoamento das redes corporais sem fio WBAN, suprimindo a necessidade no entretenimento com jogos, na área militar com apoio logístico para soldados e na monitoração de pacientes na área médica, principalmente quando existe a premissa de deslocamento constante. A introdução da WBAN para a vigilância da saúde objetiva o conforto dos pacientes e a mobilidade em suas atividades normais (Ullah et al. 2010).

As principais diferenças das características das tecnologias WSN e WBAN, em relação aos sensores e atuadores, são descritas na Tabela 1 (Latré et al. 2010).

**Tabela 1. Comparação WSN x WBAN**

<b>Propriedades dos sensores ou atuadores</b>	<b>WSN</b>	<b>WBAN</b>
Tamanho do dispositivo menor que 1 cm <sup>3</sup>	Eventualmente	Frequentemente
Possibilidade de recarregar ou substituir a bateria	Frequentemente	Eventualmente
Redundância de dispositivos	Eventualmente	Difícilmente

Baixo poder de transmissão para não afetar o corpo	Eventualmente	Frequentemente
Atenuação por interferência do corpo	Eventualmente	Frequentemente
Confidencialidade dos dados transmitidos	Eventualmente	Frequentemente

Para que exista compatibilidade entre a comunicação dos sensores de diversos fabricantes, um grupo de trabalho do IEEE desenvolveu o padrão 802.15.6 (IEEE 2012). Entre as padronizações temos o aperfeiçoamento do desempenho da WBAN na camada física PHY (*Physical Layer*) e o MAC (Fang et al. 2009).

As redes corporais sem fio têm como finalidade principal a utilização de sensores e atuadores, interna ou externamente, ao corpo humano para obter as medidas dos sinais vitais e facilitar o acompanhamento da saúde do paciente.

## 2.1. Telemedicina e WBAN

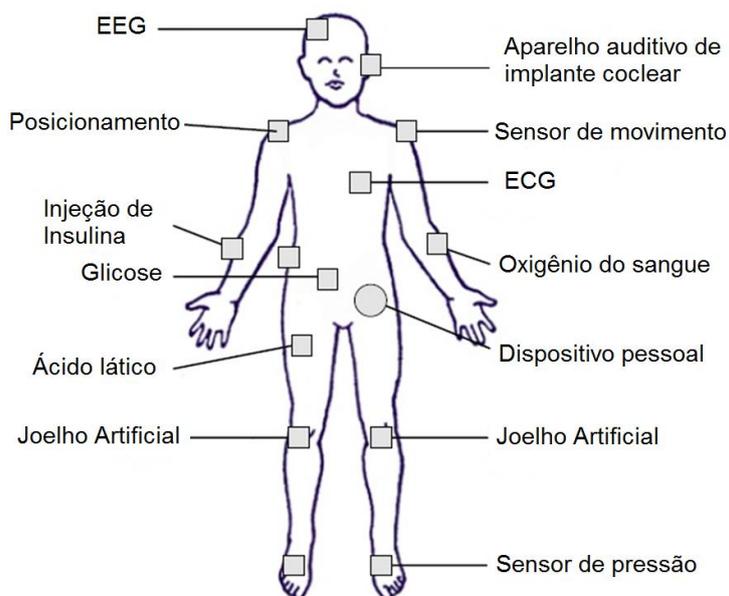
Os equipamentos eletrônicos da área médica para monitoramento de pacientes sempre estiveram presentes no meio hospitalar. Essa implementação é conhecida como eHealth (*eletronic Health*) pois disponibiliza equipamentos para instalação no corpo do paciente com ou sem fio. Os pacientes que não têm doenças críticas e que estão ligados através de cabos a esses equipamentos têm limitação no seu deslocamento. No intuito de aumentar o conforto do paciente, diminuir custos hospitalares e compartilhar recursos humanos especializados surge a telemedicina para apoiar, de modo remoto, os mais diversos segmentos da medicina. (Yuce et al. 2012)

O advento da WBAN aprimorou a telemedicina ao flexibilizar a assistência médica a distância trazendo mobilidade aos pacientes sem perder o benefício do monitoramento. Esse aprimoramento na área médica é conhecido como mHealth (*mobile Health*). Como exemplo de mHealth, atualmente a OMS (Organização Mundial da Saúde) dispõe de um programa de mHealth para controlar o uso do tabaco. (WHO 2013)

Com a utilização de sensores e atuadores no corpo humano, como mostrado na Figura 1, podem ser obtidos os sinais elétricos para realização de eletroencefalograma ou eletrocardiograma. Níveis de pressão arterial, ácido lático, glicose, oxigênio no sangue,

entre outros, também podem ser mensurados. Tais sinais e níveis são enviados para um dispositivo pessoal que transmite os resultados ou aciona os devidos atuadores que podem reestabelecer níveis normais do paciente ao administrar algum medicamento necessário (Latré et al. 2010).

Esses dispositivos podem se comunicar entre si através de uma rede WBAN.



**Figura 1. Monitoramento de paciente na WBAN (Latré et al. 2010)**

## **2.2. Estrutura e Requisitos da WBAN**

As aplicações descritas na seção anterior implicam que a WBAN consiste de vários dispositivos heterogêneos provenientes de diversos fabricantes que podem adotar o padrão IEEE 802.15.6 ou o seu próprio padrão. Neste estudo, será dada uma visão geral dos diferentes tipos de dispositivos utilizados na WBAN baseados no IEEE 802.15.6, tanto daqueles desenvolvidos pela indústria quanto os protótipos produzidos por pesquisadores. Serão descritas também as características e os requisitos desses dispositivos que incluem as taxas de dados, consumo de energia, qualidade de serviço, confiabilidade, facilidade de implementação, uso, segurança e privacidade.

### **2.2.1. Tipos de Dispositivos**

Os dispositivos mais utilizados em WBANs são:

- Sensor – Recebe dados sobre estímulos físicos e transmite essas informações pela rede sem fio. É composto por vários componentes, sendo os principais: dispositivo de medição, unidade de energia, processador, memória, rádio transmissor e antena.
- Atuador – Age de acordo com os dados recebidos pelo próprio módulo sensor ou pelos dados recebidos do sistema de acompanhamento médico ou até mesmo pela intervenção do usuário. Todos os componentes do sensor estão presentes no atuador, acrescidos apenas do hardware que realizará a administração de medicamentos no paciente ou qualquer outra ação que altere o estado do que foi mensurado, na intenção de reestabelecer parâmetros normais dos sinais vitais. Como exemplo, cita-se uma bomba de insulina que injeta a substância quando os níveis de glicose estiverem abaixo do normal.
- Concentrador de dados – Serve como coletor de dados dos sensores e atuadores, principalmente quando este tem uma baixa capacidade de transmissão. Intermedia, assim, os dados para posteriormente serem transmitidos a uma unidade de controle ou monitoramento (Marinkovic et al. 2009).
- Unidade de Controle – Reúne todas as informações adquiridas pelos sensores e informa os dados coletados ao sistema especialista. Pode realizar o envio das informações a uma central de monitoramento. Em alguns casos pode acionar um atuador ou até mesmo mostrar os dados em um *display* ou *led* indicativo. Os componentes de *hardware* do dispositivo têm poder computacional superior, rádio transmissor e antena. Em algumas implementações pode ser usado um *smartphone* (Latre et al. 2010).

### **2.2.2. Taxas de Transmissão de Dados**

Devido à grande heterogeneidade das aplicações, as taxas de dados irão variar de maneira ampla, que vão desde dados simples da ordem de kbit/s, para os mais altos com fluxos de dados na ordem de Mbit/s. Os dados também podem ser enviados em rajadas em intervalos de tempo específicos, o que significa uma taxa mais elevada durante as rajadas.

Os dispositivos como eletrocardiograma (ECG), eletromiograma (EMG), eletroencefalograma (EEG), entre outros, têm diversidades tanto no funcionamento como na necessidade de transferências de dados. As taxas de dados para essas diferentes aplicações são dadas na Tabela 2, e são calculadas por meio de taxa de amostragem de dados, largura de banda e precisão desejada das medições.

**Tabela 2. Exemplos de Aplicação de WBAN na Área Médica**

<b>Aplicação</b>	<b>Taxa de Dados</b>	<b>Largura de Banda</b>	<b>Precisão</b>
ECG (12 ciclos)	288 kbps	100-1000 Hz	12 bits
ECG (6 ciclos)	71 kbps	100-500 Hz	12 bits
EMG	320 kbps	0-10.000 Hz	16 bits
EEG (12 ciclos)	43.2 kbps	0-150 Hz	12 bits
Saturação Sangue	16 bps	0-1 Hz	8 bits
Monitor Glicose	1600 bps	0-50 Hz	16 bits
Temperatura	120 kbps	0-1 Hz	8 bits
Sensor Movimento	35 kbps	0-500 Hz	12 bits
Implante Coclear	100 kbps	-	-
Retina Artificial	50-700 kbps	-	-
Som	1 Mbps	-	-
Voz	50-100 kbps	-	-

Em geral, pode ser visto que a taxa de dados de uma única aplicação ou dispositivo não é elevada. No entanto, se a pessoa tem uma WBAN com vários desses dispositivos, as taxas de dados somadas atingem facilmente alguns Mbit/s (Latré et al. 2010).

### **2.2.3. Uso de Energia**

O consumo de energia acontece em quase todos os elementos que compõem os sensores. As principais demandas de energia são encontradas em três componentes: detecção de medidas, transmissão e processamento de dados. A etapa de comunicação sem fio é provavelmente a que mais consome energia. Na maioria dos sensores, a energia tem baixa disponibilidade e é frequentemente limitada. O tamanho da bateria utilizada para armazenar a energia necessária na maioria dos casos é o fator que mais contribui

com o peso e dimensão do sensor. O consumo de energia deve ser baixo e a bateria deve ter dimensões reduzidas. Em algumas aplicações utilizando nó sensor / atuador de uma WBAN deve-se operar apoiado no tempo de vida da bateria em meses ou mesmo anos sem intervenção. Por exemplo, um marca-passos ou um sensor de glicose exige um tempo de vida que se prolonga por vários anos (Akyildiz et al. 2002).

Alguns estudos apontam para a geração de energia oriunda de fontes do próprio corpo. A partir dos movimentos de uma pessoa, pode ser instalado um dispositivo que converta energia cinética em energia elétrica. Os dispositivos de conversão de calor em eletricidade também podem ser acoplados nos sensores (Paradiso et al. 2005).

Durante a comunicação dos dispositivos de uma WBAN existe a produção de calor. Esse calor é absorvido pelo tecido humano circundante e aumenta a temperatura do corpo. A fim de limitar a subida da temperatura e poupar os recursos da bateria, o consumo de energia deve ser ajustado a valores mínimos. A quantidade de energia absorvida pelo tecido é expressa pela taxa de absorção específica SAR (Specific Absorption Rate). Uma vez que o dispositivo pode estar sobre ou no interior de um corpo humano, a SAR pode atingir valores elevados. Essa taxa de absorção deve ser minimizada e cumprir as leis e regulamentos nacionais e internacionais para não prejudicar o indivíduo. Essas regulamentações são semelhantes à transmissão realizada por um telefone móvel quando nas proximidades do corpo humano, com rigorosas restrições na potência de transmissão (IEEE 2003).

#### **2.2.4. Qualidade de Serviços**

A qualidade do serviço (QoS) é uma questão importante a ser considerada na WBAN para a área médica. A confiabilidade da transmissão é crucial a fim de garantir que os dados monitorados sejam recebidos corretamente pelos profissionais de saúde.

O conceito de confiabilidade inclui a preservação da ordem e a entrega garantida dos dados. Além disso, as mensagens devem ser entregues em um tempo que possa atender às necessidades dos pacientes, tanto nas mensurações normais quanto nas emergenciais. A confiabilidade da rede afeta diretamente a qualidade do acompanhamento do paciente e, na pior das hipóteses, pode ser fatal quando um evento de risco de vida for detectado (Latré et al. 2010).

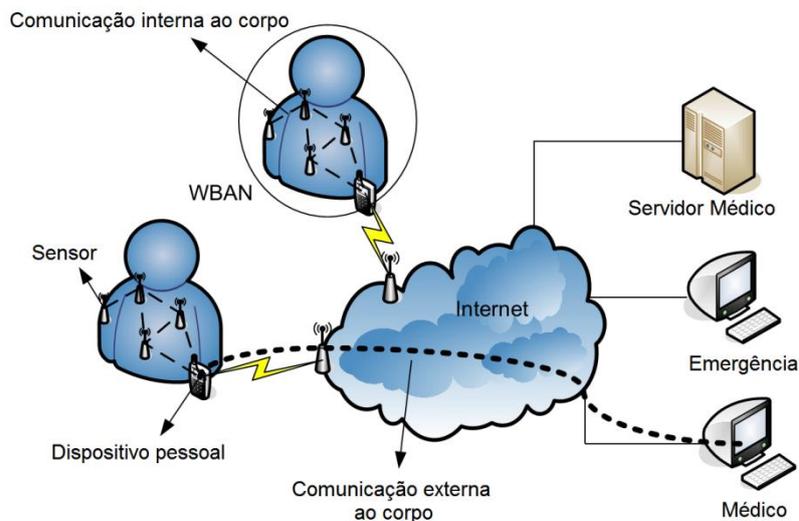
Outro exemplo para garantir a QoS provém da IEEE 802.15.6, que especifica os métodos de acesso do canal baseado em prioridade fixa geralmente aplicada a sinais vitais normais ou flexível para situações de urgência médica. Estes métodos de acesso ajudam a garantir os requisitos da QoS de diferentes aplicações (IEEE 2012).

### **2.2.5. Segurança**

O envio das informações relacionadas com a saúde coletadas dos sensores em uma WBAN para os servidores ou para a Internet é estritamente privada e confidencial. Os dados coletados devem ser criptografados para proteger a privacidade do paciente. A equipe médica precisa estar segura de que os dados coletados não foram adulterados e que de fato se originam do paciente em observação. Por ser uma rede crítica, a disponibilidade deve ser alta. A gestão de processos de autenticação e autorização internas a uma WBAN deve ser automatizada para uma eventual reconexão em caso de perda de sinal de transmissão. Os mecanismos de proteção e privacidade usam uma parte significativa da energia disponível, por isso estes devem ser energeticamente eficientes (Bhargava et al. 2003).

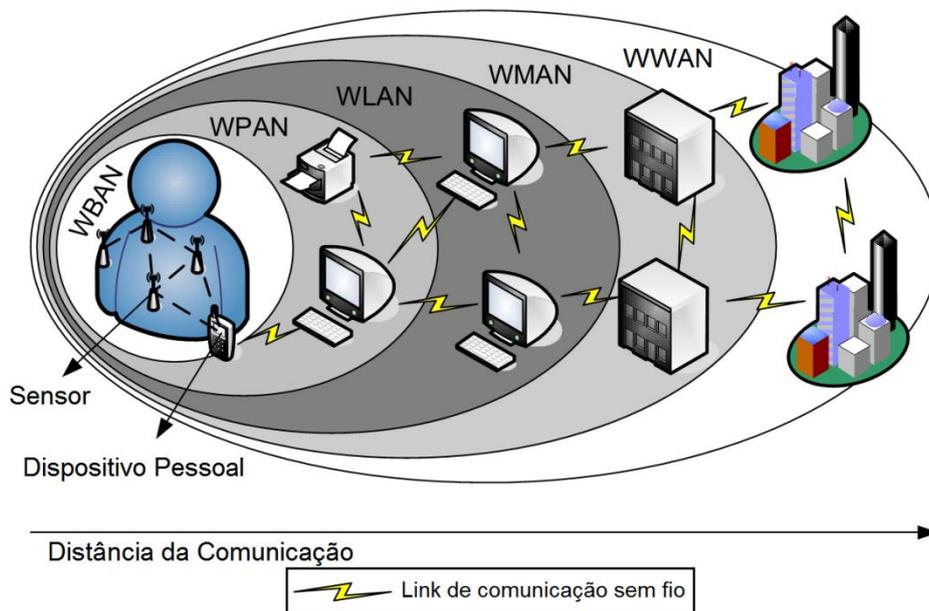
### **2.3. Contexto da WBAN**

Do ponto de vista da transposição dos dados entre redes de comunicação com diferentes finalidades, estes podem ser transportados através de diversos meios físicos e protocolos específicos para cada situação, conforme mostrado na Figura 2. Em uma primeira fase de comunicação está a WBAN que circunda o corpo humano (*intra-body*) e é composta de sensores, atuadores e dispositivo pessoal. Na outra fase de comunicação, os dados são transmitidos para fora da rede WBAN (*extra-body*) e possui as mais diversas funções como, por exemplo, armazenamento de dados do paciente, deslocamento de equipe de emergência para atendimento ao paciente, entre outras (Latré et al. 2010).



**Figura 2. Comunicação intra-body e extra-body na WBAN (Latré et al. 2010)**

Em relação a outras topologias de rede de comunicação sem fio utilizadas no dia a dia, a WBAN encontra-se disposta entre as de menor abrangência geográfica, pois é utilizada no próprio corpo humano, conforme pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3. WBAN em relação a outras redes (Latré et al. 2010)**

## 2.4. Camada Física

Em concordância com o próprio nome, a área de abrangência de uma WBAN é o corpo humano. Comparando com o modelo WSN de uso geral, o corpo humano apresenta várias barreiras pela sua característica físico-química. A principal interferência é nas ondas de rádio frequência durante a transmissão de dados entre nós sensores e o nó coletor de dados.

Testes realizados mostraram falhas de comunicação entre os nós situados na área frontal do paciente e nós localizados na parte posterior. Esse fato pode ser acentuado quando a potência de transmissão for definida para uso mínimo por razões de economia de energia (Ruzzelli et al. 2007).

Conclusões semelhantes foram encontradas em diversas simulações, experimentos e pesquisas. Os melhores resultados foram obtidos quando a antena foi colocada a 1 cm acima do corpo, o que na maioria das implementações não é possível. (Latre et al. 2010)

### 2.4.1. Modelo do Canal

O modelo de canal do MAC é importante para criar e aperfeiçoar as técnicas de comunicação utilizadas na camada física PHY (*Physical Layer*). Basicamente, estão ligadas ao desenvolvimento de antenas mais eficazes com SAR menor, melhoria de propagação do sinal, ampliação no desempenho da camada PHY e prevenir falhas de conexão, incluindo reconfigurações alternativas dos sensores (Chen et al. 2011).

Diversos pesquisadores realizaram estudos em várias bandas de frequência, como exemplo, 402 ~ 405 Hz para sensores implantados, 13,5 MHz, de 5 a 50 MHz, 400 MHz, 600 MHz, 900 MHz, 2,4 GHz e 3,1 ~ 10,6 GHz para sensores no corpo. Esses estudos têm mostrado que três fatores contribuem para as características dos modelos de canais. São eles: o ambiente onde está localizado o paciente, o posicionamento do sensor no corpo e a mobilidade do usuário da WBAN.

O ambiente onde o usuário WBAN está localizado pode prejudicar a utilização dessa tecnologia, ou seja, dentro de casa, ao ar livre, se o usuário é móvel, dependendo de quão intensa é a interferência de outros usuários nas proximidades.

O posicionamento onde o sensor ou atuador é colocado no corpo do paciente contribui para determinar as características do modelo de canal. Pode ser implantada interna ou externa ao corpo, instalada nos membros, cabeça ou tronco. Com relação ao modo de propagação ao longo do corpo humano, este pode ser dividido em dois tipos: com linha de visada LOS (*Line of Sight*) e sem linha de visada NLOS (*Non Line of Sight*). Os sensores podem estar alinhados sem obstáculos entre eles, no modelo LOS conhecida também como ligados com visada direta. Porém, pode ocorrer que os dispositivos tenham obstáculos entre eles e não estejam alinhados, que é o modelo NLOS, disposição essa também denominada como ligados sem visada direta.

A mobilidade que o usuário da WBAN realiza pode comprometer ou não o desempenho da rede. Como exemplo de mobilidade do usuário: caminhar, correr, saltar. A duração da atividade física também é determinante nas características do modelo de canal. Essas e outras características impõem limites nas transmissões de rádio frequência (Chen et al. 2011).

#### **2.4.2. Transmissão por Rádio Frequência**

Geralmente, em redes sem fio, sabe-se que a potência transmitida cai com  $d^n$  em que  $d$  representa a distância entre o emissor e o receptor e  $n$  o coeficiente de perda de percurso. No espaço livre,  $n$  tem um valor de 2 (Gupta et al. 2003).

Vários pesquisadores têm investigado a perda de sinal nas transmissões de ondas de rádio no uso de WBAN na superfície e na parte interna do corpo humano, adotando para tais pesquisas tanto sinais de rádio de banda estreita quanto banda ultra-larga UWB (*Ultra Wide Band*). Em sua maioria, chegaram à conclusão de que o sinal de rádio tem grande perda durante as transmissões. Além das perdas de sinal de rádio como desvanecimento, reflexão e difração, existe a perda de sinais devido à propagação por múltiplos caminhos. A propagação pode ser classificada também de acordo com a aplicação: interna ao corpo ou sobre o corpo (Latre et al. 2010).

Em se tratando de transmissão interna ao corpo, este pode funcionar como um canal de comunicação, porém as ondas eletromagnéticas podem ser bloqueadas durante a transmissão. As perdas são principalmente devido à absorção de energia no tecido, que é dissipada na forma de calor. O tecido consiste fundamentalmente de água onde as ondas

eletromagnéticas são atenuadas consideravelmente antes de chegar ao receptor (Latre et al. 2010).

Na transmissão de rádio frequência interna ao corpo humano, a taxa de absorção específica (SAR) que determina a quantidade de energia perdida devido à dissipação de calor absorvida pelo tecido humano é elevada, se comparada ao uso da WBAN com dispositivos instalados ao redor do corpo. Se comparada com a propagação em espaço livre, estudos demonstram que a perda durante percurso é muito alta, existindo um adicional de 30-35 dB (Tang et al. 2005).

Diversos fatores exercem interferência na transmissão de dados entre dispositivos durante o uso das WBANs. O sucesso da comunicação é influenciado pela dimensão, forma, sexo e idade do paciente. Outros fatores como os movimentos realizados pelo corpo e a posição onde forem instalados os sensores, também influenciam. Alguns pesquisadores apontam que a diferença entre as formas do corpo são pelo menos tão grandes como o impacto dos movimentos do braço de um paciente (Latre et al. 2010).

As transmissões externas ao corpo ocorrem na maioria dos dispositivos utilizados em uma WBAN. No modelo LOS, os efeitos de curvatura do corpo não são levados em consideração sendo adotado para análise apenas um lado do corpo. No caso de não haver linha de visada, o efeito de propagação da parte da frente em relação à parte de trás do corpo é analisado.

O modelo de propagação ao longo do corpo humano com linha de visada foi estudado tanto por meio de simulações quanto por experimentos. Estudos foram realizados para sinais de banda estreita e ultra-larga. Nos resultados encontrados verificou-se que um dos principais fatores de perda está relacionado com a altura do dispositivo sobre o corpo. Quanto mais próximo a antena está do corpo, maior será a perda. Uma diferença de mais de 20 dB é encontrada variando a altura da antena entre 1 mm até 5 cm (Latre et al. 2010).

No caso do NLOS, não há visada direta entre o emissor e o receptor. Ondas eletromagnéticas sofrem difração ao redor do corpo ao invés de ter um caminho direto através do corpo. Devido à difração e à absorção de uma quantidade maior de radiação em torno do corpo humano, foi observada uma maior perda no modelo de propagação ao sem visada NLOS do que no modelo com visada LOS (Latre et al. 2010).

Tanto nas transmissões internas como nas externas o movimento do corpo desempenha um papel importante no nível do sinal recebido.

### **2.4.3. Projeto da Antena**

Quando da especificação e projeto da antena em ambientes WBAN vários fatores podem influir no design da antena, tais como a postura do usuário, peso e até mesmo o envelhecimento de sua pele. Outro fator a ser considerado é o local do corpo onde será instalada a antena. Nesse ambiente corporal aplicam-se as restrições de tamanho, forma e material a ser empregado.

Em relação a aspectos físicos, as antenas para aplicações WBAN podem ser classificadas em dois grupos: elétrica e magnética. Como exemplo, podem-se citar a antena dipolo e a antena loop, respectivamente. Para antenas que são colocadas no interior do corpo humano devem ser utilizados apenas material não corrosivo e bio-compatível, tais como platina ou titânio, entre outros, mesmo sendo materiais com propriedades eletromagnéticas inferiores ao cobre (Chen et al. 2011).

Outro aspecto é quanto à SAR. Deve ser evitado o aumento da temperatura do tecido humano, conseqüentemente a potência na antena de uma WBAN deve ser mínima. O FCC - *Federal Communications Commission* e o ETSI - *European Telecommunications Standards Institute* regulam que a potência máxima de saída seja de 25  $\mu$ W. No Brasil a ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações utiliza a Resolução nº 533, de 10 de setembro de 2009 com especificações semelhantes as encontradas na FCC (ANATEL 2009).

Como esta camada é uma das mais importantes da WBAN e, também, o objetivo de estudo desta dissertação, será detalhada separadamente no próximo capítulo.

## **2.5. Conclusão**

Neste capítulo, foram apresentadas as características da rede corporal a partir da revisão bibliográfica. No que concerne a WBAN foram expostos sua estrutura, requisitos, contexto e o detalhamento da camada física.

No decorrer do levantamento bibliográfico constatou-se que o uso da WBAN é de extrema importância para aplicações na área da telemedicina, propondo soluções para mobilidade de pacientes que precisam de suporte médico à distância e possibilitando a diminuição do custo dos serviços hospitalares (Latré et al. 2010).

No próximo capítulo, serão descritos as principais características e os principais esquemas de acesso MAC para redes corporais.

### **3. Mecanismos de Controle de Acesso (MAC) para Redes Corporais**

A camada de rede MAC é responsável principalmente por controlar o acesso ao meio de transmissão. Uma rede corporal deve respeitar os conceitos e características já discutidos no capítulo anterior. Nesse capítulo serão detalhados os mecanismos de controle de acesso (MAC) para redes corporais.

#### **3.1. Especificações gerais MAC da WBAN**

Para determinar as especificações MAC da WBAN devem-se conhecer aspectos como topologia de rede, modelo de referência, formato do quadro MAC, camada PHY e escalonamento.

##### **3.1.1. Topologia de rede**

Na IEEE 802.15.6 (IEEE 2012) a topologia WBAN é denominada apenas como rede de área corporal, nesta dissertação como REDE, pois atende aos atributos tanto de rede sem fio, quanto rede com outras mídias. No caso da WBAN foi projetada tanto para atender aos requisitos MAC quanto ao gerenciamento de energia. Nesse modelo, os concentradores e os nós da rede são organizados em grupos lógicos, na Figura 4 demonstrados como REDE 1 e REDE 2, e um conjunto de especificações é estipulado para realizar a comunicação entre os equipamentos de cada grupo e também entre os grupos. O escalonamento pode ser definido entre as mais diversas técnicas como exemplos TDMA ou *polling* fazendo com que exista a transmissão de mensagens entre os equipamentos. Na Figura 4, o equipamento  $N1(x)$ , que pode ser um sensor, estabelece comunicação com o concentrador H1, porém,  $N1(x)$  não se comunica diretamente com os outros equipamentos do grupo e, também, não se comunica diretamente com os equipamentos de outros grupos.

Outro aspecto a ser considerado é a comunicação entre os grupos H1 e H2 que deve ser observada para minimizar as interferências conforme demonstrado na Figura 4. A coexistência pode ser assegurada com a transmissão sendo controlada pelos números de identificação dos grupos. Os grupos trocam mensagens através dos concentradores ou um outro mecanismo opcional de comunicação, como exemplo um nó máster.

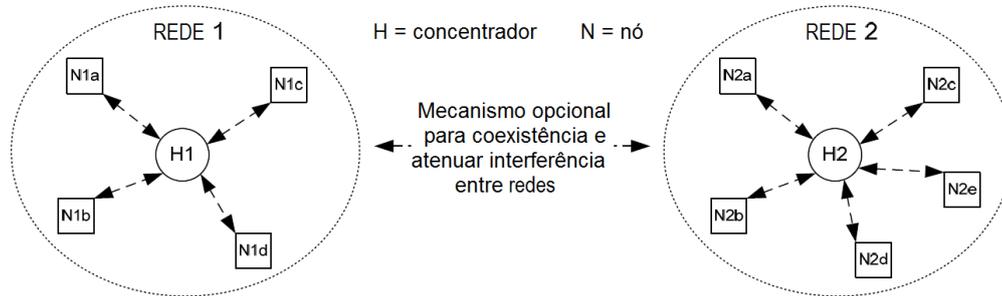


Figura 4. Topologia de Rede (IEEE 2012)

### 3.1.2. Modelo de referência

A norma IEEE 802.15.6 padroniza a camada MAC conforme o modelo mostrado na Figura 5. A comunicação entre os nós e o concentrador permeia a camada PHY e é na camada MAC que são propiciados os serviços como segurança nas mensagens transmitidas entre os equipamentos.

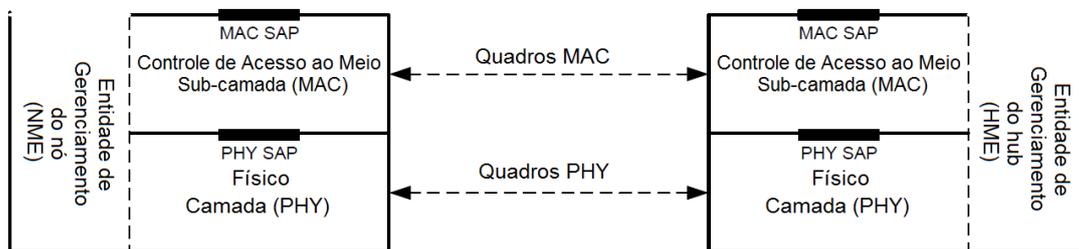


Figura 5. Modelo de Referência (IEEE 2012)

Durante a passagem de quadros entre camadas, o modelo MAC provê um serviço de cliente MAC denominado *Service Access Point* (SAP) que é o serviço de ponto de acesso, um procedimento interno que ocorre entre a camada MAC e a camada superior. O mesmo ocorre no modelo PHY e é denominado PHY SAP que recebe os quadros provenientes da camada MAC. Esse modelo torna-se inverso quando recebido pelo concentrador conforme mostrado na Figura 5. O gerenciamento lógico pode ser do tipo escalonado por *polling* e é designado *Node Management Entity* (NME) para o nó e o *Hub Management Entity* (HME) para o concentrador ou *hub*.

### 3.1.3. Formato do quadro MAC

O formato do quadro MAC é composto, basicamente, por três elementos: Cabeçalho MAC (*MAC Header*), Corpo do Quadro MAC (*MAC Frame Body*) e a Sequência de Consistência do Quadro (*FCS – Frame Check Sequence*) conforme mostrado na Figura 6. A ordem dos octetos é da esquerda para a direita e indicada por L-R (*left-right*), sendo essa a sequência de transmissão. O tamanho do corpo do quadro ( $L_{FB}$  – *Length\_FrameBody*) é determinado de tal forma que  $0 \leq L_{FB} \leq pMaxFrameBodyLength$ , onde  $pMaxFrameBodyLength$  é o tamanho máximo do corpo do quadro.

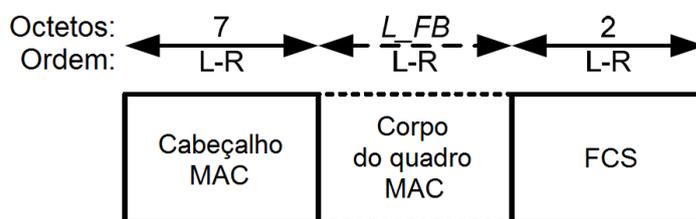


Figura 6. Formato do Quadro MAC (IEEE 2012)

O cabeçalho MAC mostrado na Figura 7 é subdividido em: controle do quadro, identificação do destinatário, identificação do transmissor e identificação da rede.

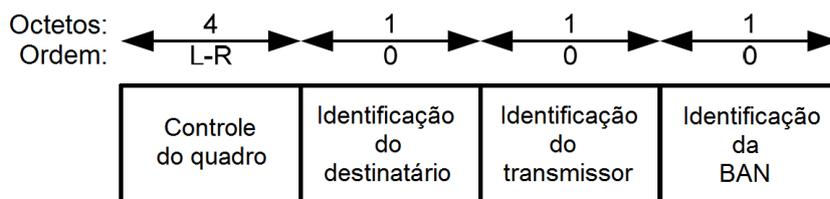


Figura 7. Formato do Cabeçalho MAC (IEEE 2012)

Em um corpo de *frame* MAC, o seu tamanho é designado pela sigla  $L_{FP}$  (*Length\_FramePayload*) e é válido quando este tiver um valor maior que zero. É composto por: número sequencial de baixa segurança, quadro com carga útil e código de integridade da mensagem (*MIC – Message Integrity Code*), conforme apresentado na Figura 8. O quadro com carga útil é o conjunto de dados que está sendo transmitido.

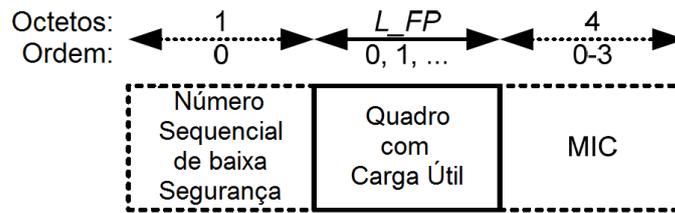


Figura 8. Formato do corpo de um *Frame* MAC (IEEE 2012)

### 3.1.4. Especificação da camada PHY

Nesta especificação da IEEE 802.15.6 para a camada PHY, é responsabilidade desta camada: ativar e desativar o rádio transceptor, avaliar a clareza de um canal interno, transmitir e receber dados. Esta especificação também provê uma forma de transformar uma unidade de dados de serviço da camada física (*PSDU – Physical-Layer Protocol Data Unit*) em uma unidade de dados de protocolo da camada física (*PPDU – Physical-Layer Service Data Unit*).

Durante a transmissão o PSDU deve ser pré-anexado com uma introdução e um cabeçalho da camada física para criar o PPDU. No receptor, a introdução e o cabeçalho de camada física atuam como auxiliares na desmodulação, descodificação e entrega dos PSDU.

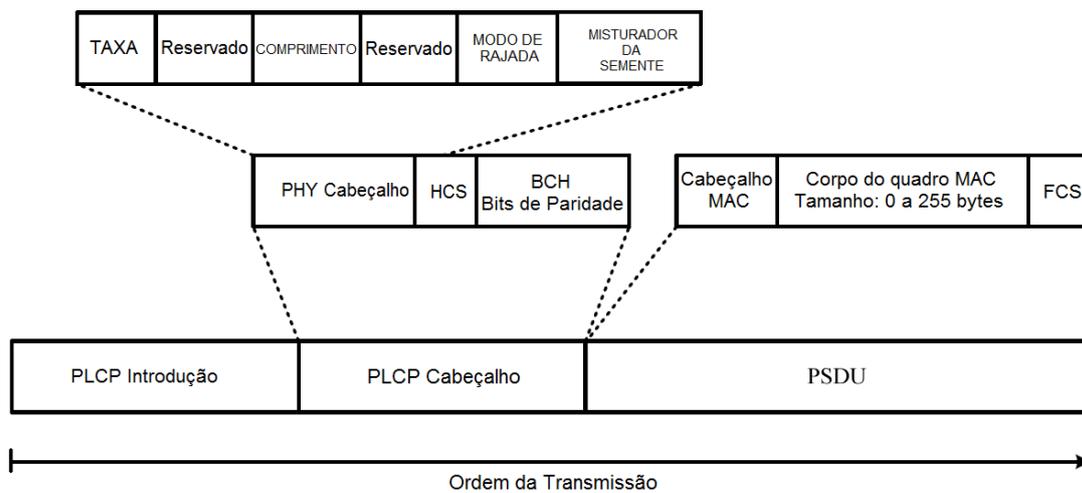


Figura 9. Estrutura Padrão do PPDU (IEEE 2012)

O PDU que é composto por três componentes principais: a introdução do protocolo de convergência da camada física (PLCP – *Physical Layer Convergence Protocol*), o cabeçalho PLCP e o PSDU conforme apresentado na Figura 9. Os componentes vêm enumerados pela ordem de transmissão. A introdução PLCP é o primeiro componente da PDU que tem a finalidade de auxiliar o receptor durante a sincronização de temporização e de recuperação da portadora-offset.

### **3.1.5. Especificação do escalonamento**

Os problemas encontrados nas WBANs incluem a perda de pacotes nas transmissões, o consumo elevado de energia das baterias dos sensores, o monitoramento de pacientes exigido em tempo real, entre outros. Entre as propostas para solucionar os problemas existem aquelas que incluem a redefinição de como deve ser empregada a camada MAC, aplicação de novas topologias, reestruturação de modelos de comunicação, reformulação de protocolos. Estão descritas abaixo as propostas para solucionar os problemas encontrados na WBAN.

A camada MAC deve prover alta confiabilidade, baixa latência e baixo consumo de energia. As aplicações são as responsáveis pela confiabilidade e latência e o consumo de energia está ligado ao ciclo de trabalho e a complexidade do protocolo. Normalmente, os sensores do corpo têm uma capacidade de bateria muito limitada, especialmente para aqueles sensores que são colocados no interior do corpo. Para aumentar a vida útil dos sensores, os protocolos MAC devem ser dotados de eficiência energética (Chen et al. 2011).

Para resolver o problema crítico de prolongamento da vida útil do sensor, vários protocolos MAC têm sido propostos para as RSSF. Nestes protocolos, o rádio é ligado e desligado periodicamente para economizar energia. Estudos de protocolos MAC denominados pelos seus pesquisadores de S-MAC, T-MAC, e TRAMA propõem sincronizar um agendamento de transmissão e períodos de escuta para maximizar a produtividade, reduzindo energia, desligando os rádios durante um período de inatividade dos sensores colocando-os para dormir. Por outro lado, o baixo nível de escuta se aproxima dos protocolos como o WiseMAC e o B-MAC, onde seus pesquisadores

escolheram um canal de pesquisa que verifica se um nó precisa acordar para transmissão ou recepção de dados (Chen et al. 2011).

Outros estudos como o SCP-MAC usa um sistema de *polling* para sincronizar os tempos de comunicação entre os sensores, eliminando longos preâmbulos em LPL - *Low Power Listening* para todas as transmissões, permitindo assim ciclos muito baixos, com conseqüente economia de energia. (Chen et al. 2011)

Nos últimos anos, vários protocolos MAC também têm sido propostos especificamente para WBAN.

### **3.2. Protocolos MAC Específicos para WBAN**

O protocolo MAC para WBAN está sendo constantemente reelaborado para satisfazer algumas exigências como: um baixo consumo de energia, qualidade dos serviços, segurança, entre outras. Além da força tarefa do grupo que trabalha no IEEE 802.15.6 (IEEE 2003), vários pesquisadores propõem as mais diversas soluções para atender a esses requisitos conforme descritas abaixo:

- BAN-MAC é um protocolo MAC de baixo consumo de energia, concebido para topologia em estrela. É adaptado as necessidades específicas dos biosensores, sendo projetado para ser compatível com IEEE 802.15.4 (IEEE 2003). Ao receber os dados de retorno dos sensores, esse protocolo MAC ajusta dinamicamente os parâmetros do protocolo para melhorar a conservação de energia em sensores com baixo nível de energia (Chen et al. 2011);
- H-MAC, protocolo MAC baseado em TDMA projetado para WBAN, tem como objetivo melhorar a eficiência energética através da exploração de informações ritmo cardíaco para executar a sincronização de tempo (Chen et al. 2011);
- Um protocolo MAC proposto por Lamprimos e outros pesquisadores, estuda uma arquitetura mestre-escravo desenhada para evitar escuta ociosa, onde os escravos são bloqueados pelo mestre e vão para o modo

de espera até serem chamados pelo mestre, assim economizando energia (Lamprinos et al. 2005);

- Um protocolo MAC na topologia de rede em estrela que suporta TDMA para reduzir a probabilidade de colisão e escuta ociosa é proposto em (Omeni et al. 2008). Neste protocolo cada nó escravo é autorizado em um *slot* pelo nó central. Quando ocorre um alarme de um dos nós, a esse nó pode ser atribuído um *slot* extra para a comunicação direta;
- Um esquema de acesso baseado em *polling* entre os nós sensores e o nó *master* foi proposto em (Motoyama 2012). Nesse caso o *superframe* é sem limites e descarta o modo de sinalização no início do pacote. Na técnica de acesso através de *polling* os sensores são inspecionados em uma sequência pré-determinada.

Constantemente surgem novas propostas de protocolos MAC específicos para WBAN e podem ser incorporados em estudos futuros.

### 3.3. QoS na WBAN

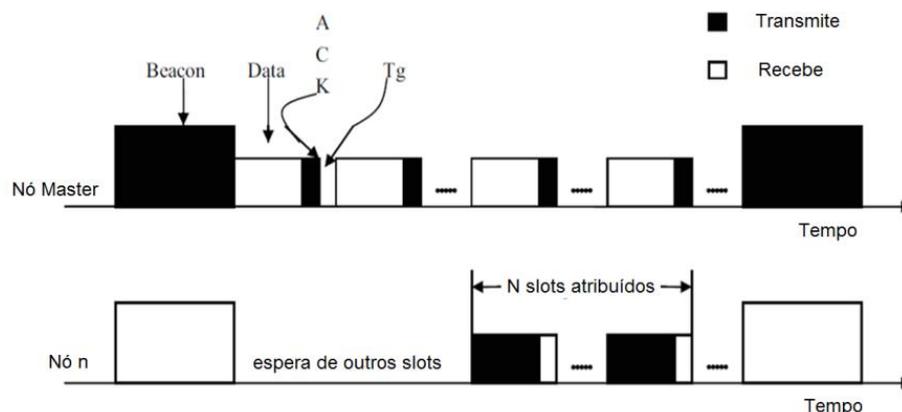
Trabalhos em curso no desenvolvimento do IEEE 802.15.6 visam apoiar as aplicações com várias taxas de dados, onde as garantias de QoS são cruciais em caso de condições de risco de vida. Experiências com áudio e vídeo também são importantes para projetar WBAN, embora menos críticas.

As técnicas de QoS têm necessidades específicas na WBAN. Por exemplo, em muitas situações, essas redes têm de tratar das comunicações em tempo real. Com a taxa de amostragem relativamente elevada de alguns sensores tal como ECG, é importante que os dados sejam enviados imediatamente ao seu destino. Para tanto existem vários esquemas de programação. Os principais estão relacionados com programação em nós e coordenação do canal de acesso.

Conforme em (Chen et al. 2011), pesquisadores desenvolveram o BodyQoS que tem como objetivo fornecer QoS na WBAN, com serviço prioritário de fluxo de dados, *frame* assimétrico QoS e rádio diagnóstico do QoS e Agendamento Banda Adaptativo e ainda um grupo desenvolveu o que denominaram de DQBAN, que é um protocolo MAC

visando proporcionar melhor suporte QoS. Ele usa um algoritmo de escalonamento baseado em regras da lógica *fuzzy* para otimizar o desempenho da camada MAC em termos de QoS e eficiência energética. (Chen et al. 2011)

Em outro artigo, um protocolo MAC sensível ao contexto é proposto (Yan et al. 2011). Dependendo da mudança dos parâmetros fornecida pelos sensores, este protocolo age em dois estados para garantir QoS: normal e emergencial. A topologia estrela é a escolhida tendo um nó *master* e vários nós sensores. A tecnologia de acesso é o TDMA que evita problemas de colisão e tempo ocioso de escuta. Os nós sensores transmitem dados em seus *slots* dedicados. Assim, periodicamente podem dormir e acordar e, portanto, reduzir o consumo de energia. A estrutura de quadro MAC consiste de duas partes: a sinalização (*Beacon*) e a transmissão de dados (*Data*). No *slot Beacon*, o nó *master* atribui *slots* para cada nó sensor, transmitindo o pacote de sinalização. Ao estabelecer link de comunicação, os nós sensores obtêm informações de sincronização no *slot Beacon*, assim, os *slots* de dados são atribuídos a nós sensores para transmissão de dados. Nós sensores podem obter um ou mais *slots* para aplicação periódica ou em rajadas, dependendo de suas características de tráfego. Esta atribuição de *slots* sob demanda atenua a sobrecarga causada por atribuição de *slots* fixos, onde os nós com baixa de transmissão de dados mantêm reservados um mínimo *slot* em cada *frame*. No interior de um *slot*, um nó sensor deve esperar a recepção de um pacote de confirmação de recebimento (ACK) a partir do nó *master* para reconhecer a transmissão bem-sucedida de um pacote de dados. Existe também um intervalo de tempo de guarda ( $T_g$ ) entre dois *slots* de dados, a fim de evitar a sobreposição de *slots*.



**Figura 10. Estrutura de *frame* TDMA MAC (Yan et al. 2011)**

Quando a transmissão de dados no último espaço é concluída, o próximo quadro começa com outro *slot Beacon*. A alocação de *slots* de próximo quadro permanece fixo se o *master* não detecta emergência no quadro anterior. De outro modo, a estrutura do quadro seguinte deve ser alterada para cumprir os requisitos do estado de emergência. Primeiramente, o nó *Master* atribui a todos os nós o *status* normal. Os nós sensores transmitem em seus respectivos *slots* os parâmetros para o nó *master* e vão dormir como pode ser observado na parte inferior da Figura 10. O nó *master* analisa os dados e se estiver com parâmetros normais, mantém a primeira quantidade *slots* para cada nó sensor. Caso a análise do nó *master* encontre anomalias, este altera a quantidade *slots* para cada nó sensor conforme a urgência de cada um. Quando os nós sensores acordam, recebem uma nova quantidade de *slots* que cada um deve transmitir. Quando a emergência acaba o nó *master* volta a estipular o status normal (Yan et al. 2011).

### **3.4. Polling na WBAN**

No artigo apresentado em (Motoyama 2012) é utilizado o acesso por *polling* entre os nós sensores e o nó monitor (*sink*). O esquema usa o modo *superframe* sem limites e descarta o modo de sinalização no início do pacote (*non-beacon mode*). Na técnica de acesso através de *polling*, os sensores são inspecionados em uma sequência pré-determinada. Ao final da inspeção, se o sensor contiver dados, estes serão transmitidos. Caso o sensor não contenha dados, o próximo sensor será inspecionado. Em uma situação normal ( $i, i+1$  e  $i+M$ ), após o último sensor ser inspecionado o ciclo recomeça. No caso de uma situação emergencial, o sensor que estiver em situação emergencial receberá prioridade sobre os outros e será inspecionado com mais frequência ( $j, j+1$  e  $j+M$ ) para que exista garantia de atendimento nessas condições de emergência, como ficou demonstrado na Figura 11 (Motoyama 2012).

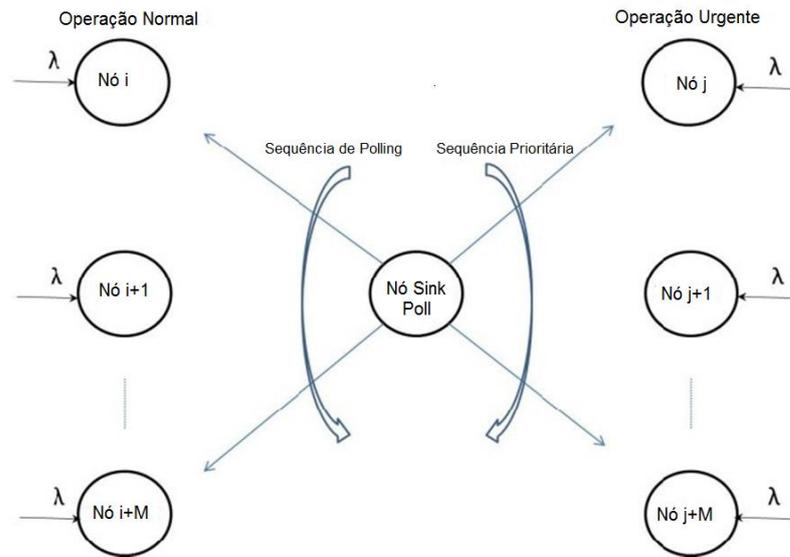


Figura 11. Operação com *polling* flexível (Motoyama 2012)

### 3.5. Esquema Hierárquico

Neste modelo, a topologia de rede WBAN utilizada é a hierárquica, conforme mostrado na Figura 12. Uma vez que as distâncias entre sensores na WBAN são de geralmente menos de 1 metro, essa disposição permite uma menor distância entre os nós *masters* (MN<sub>x</sub>) e nós sensores (S<sub>xy</sub>), evitando assim perda de pacotes. Nós *masters* são colocados em torno do paciente. Esses nós se comunicam com nó de monitoramento (MS) para a transmissão dos sinais a longas distâncias (Marinkovic et al. 2009).

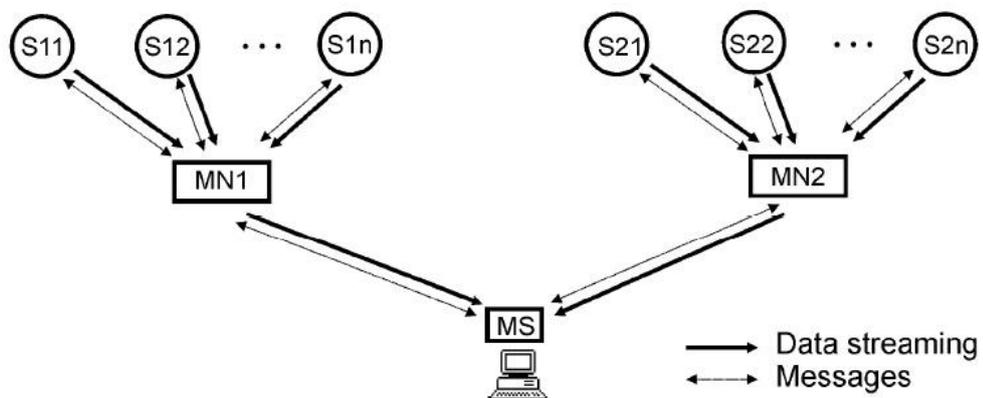


Figura 12. Topologia hierárquica (Marinkovic et al. 2009)

### **3.6. Conclusão**

Neste capítulo foi apresentado o esquema de controle de acesso MAC para redes corporais a partir da revisão bibliográfica. Foram descritos protocolos específicos para WBAN que utilizavam técnicas TDMA e *Polling* para acesso entre os dispositivos.

Após o levantamento bibliográfico, será proposto no capítulo 4 um esquema de *Polling* Hierárquico para uso na WBAN. Nesta abordagem, o estudo possibilita a ampliação das aplicações para uma WBAN e contribui para minimizar a irradiação de ondas eletromagnética no corpo humano.

Visto isso, no próximo capítulo será apresentado um modelo teórico de funcionamento de uma WBAN e este comparado a um simulador computacional criado para essa finalidade.

## 4. Análise de Desempenho do *Polling* Hierárquico

O conceito de topologia hierárquica para WBAN foi apresentado pela primeira vez em (Marinkovic et al. 2009). A ideia era minimizar o desvanecimento de sinais devido ao movimento constante do paciente usando WBAN. Os nós dos sensores têm curto alcance, tipicamente menos de 1 metro. Devido à potência de transmissão ser muito baixa, o desvanecimento de sinal pode ser frequente. No trabalho apresentado em (Marinkovic et al. 2009), os sensores foram divididos em grupos e cada grupo é atendido por um nó intermediário que utiliza a técnica com base em TDMA. Os nós intermediários são servidos por outro nó *hub* que também usa a técnica TDMA.

No trabalho apresentado em (Motoyama 2013), também, foi utilizado o conceito da topologia hierárquica, no entanto, a técnica de coleta de dados baseia-se em *polling*. Nessa proposta, os nós sensores do primeiro nível também são divididos em grupos e os nós *sinks* coletam os dados de cada grupo utilizando a técnica de *polling* e no segundo nível o nó *master* coleta todos os dados de nós *sinks* que utilizam também a técnica de *polling*.

Neste capítulo, o desempenho do *polling* hierárquico será estudado através da simulação para verificar se o modelo teórico é um bom modelo com as suposições adotadas. Serão considerados, também, diferentes parâmetros de rede para melhorar o desempenho do *polling* hierárquico.

### 4.1. *Polling* Hierárquico

O conceito de *polling* hierárquico aplicado num corpo humano é ilustrado na Figura 13.

Sensores como eletroencefalograma (EEG), eletrocardiograma (ECG), temperatura (TPR), entre outros, são colocados na parte superior do corpo e são atendidos pelo *sink* 2, que está ligado ao braço, conforme mostrado na Figura 13. Os sensores como o de movimento (MTN), eletromiograma (EMG), glicose (GLC), entre outros, são colocados na parte inferior do corpo e atendidos pelo *sink* 1 preso em um cinto. O nó *master* que realiza *polling* nos nós *sinks* pode ser um *smartphone* ou um dispositivo próximo ao corpo. Este dispositivo tem conexão com à Internet de modo que os dados

dos sensores possam ser armazenados e/ou processados em um hospital ou mostrados a um médico para realizar o diagnóstico do paciente monitorado.

O protocolo de comunicação utilizado entre os sensores do mesmo grupo e o nó *sink* opera resumidamente da seguinte forma: O nó *sink* transmite um pacote em broadcast contendo um número de algum nó sensor do grupo (cada nó sensor possui um número de identificação único) que é uma autorização para que o nó sensor especificado possa transmitir os dados. Este pacote contém em seu cabeçalho bits suficientes para a sincronização do nó *sink* com o nó sensor. Após o reconhecimento do seu número, se o nó sensor tem pacotes para transmitir então a transmissão começa. Após a transmissão, o nó sensor aguarda pelo pacote de confirmação caso haja necessidade de retransmissão. Se o nó sensor não tem pacotes para transmitir, o transceptor é desligado para economizar energia. Quando o nó *sink* transmite o pacote de autorização ele detecta se o nó sensor está desligado em um curto intervalo de tempo. Se os dados não chegarem a partir do nó sensor investigado, então o nó *sink* conclui que o nó sensor não tem dados para transmitir e começa a investigar o próximo nó sensor na sequência.

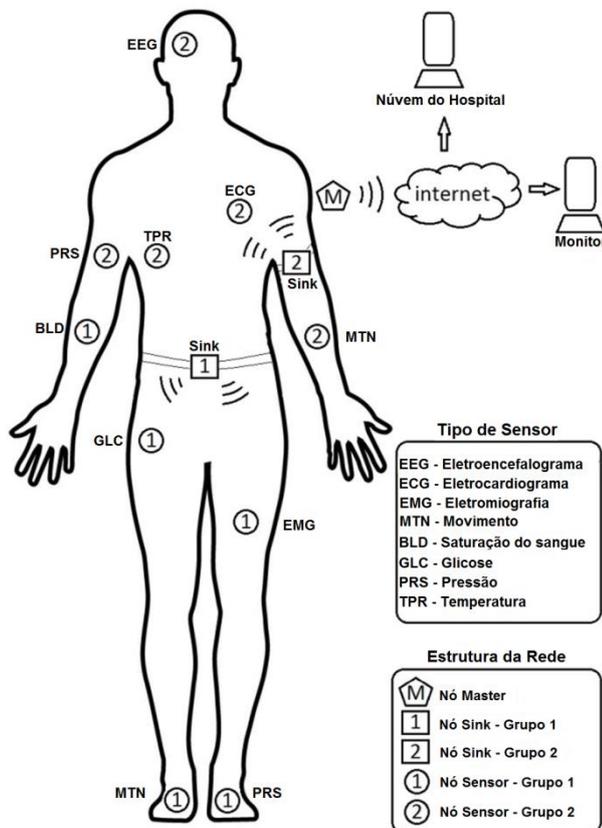


Figura 13. Conceito de polling hierárquico aplicado ao corpo humano.

Neste esquema de comunicação praticamente todas as funções de comunicação estão no nó *sink*, e apenas a função de transmissão é atribuída ao nó sensor objetivando a economia de energia.

Este mesmo protocolo de comunicação descrito pode ser utilizado no segundo nível quando o nó *master* investiga os nós *sinks* para obter os dados. Provavelmente para uma WBAN, apenas dois níveis são suficientes.

#### 4.2. Modelagem de *Polling* Hierárquico

Para a análise do desempenho, o *polling* hierárquico pode ser modelado como mostrada na Figura 14. No que tange aos equipamentos, o Grupo 1 pode operar com frequência de 433Mhz para comunicação entre os sensores e o *sink* 1 tendo no cabeçalho MAC a identificação do grupo com o número 1. A mesma frequência de 433 Mhz pode ser utilizada no Grupo 2 e para que não exista conflitos entre os grupos o cabeçalho MAC tem a identificação do grupo com o número 2. No caso da comunicação entre os nós *sink* e o nó *master* pode ser utilizado o equipamento MICAz pois pode trabalhar em uma frequência diferente dos sensores, como exemplo a ZigBee 2.4 GHz, e atende também uma faixa de banda suficiente para transmitir até 250 kbps (Crossbow 2014).

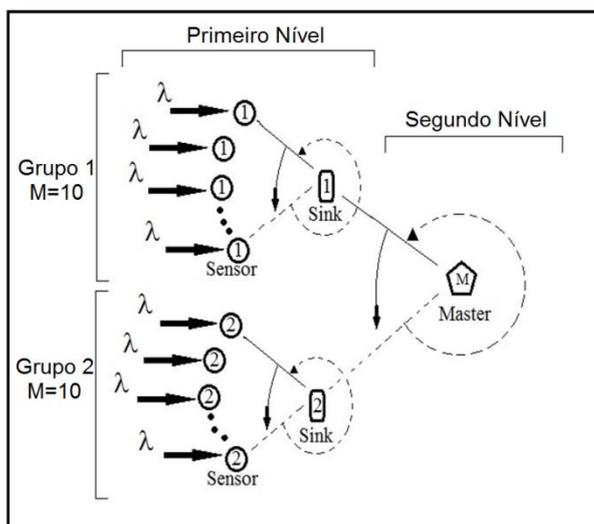


Figura 14. Modelo de *polling* hierárquico.

Conforme visto na Figura 14, o primeiro nível da hierarquia é constituído de um número de sensores distribuídos em grupos onde cada grupo é investigado por um *sink*. As setas representam os pacotes gerados por cada sensor com taxa de pacotes  $\lambda$  (pacotes/s). No segundo nível, os nós *sinks* são investigados pelo nó *master*.

Com base no modelo de rede apresentada na Figura 14, um programa de simulação em linguagem Java foi desenvolvido para a análise do desempenho do sistema de *polling* hierárquico.

Os parâmetros de entrada do programa de simulação são: O tamanho médio do pacote de  $E\{X\} = 900$  bits, a capacidade do link  $R_1 = 20$  kbps, o tempo de transmissão do pacote dado por  $E\{X\}/R_1 = 45$  ms (milissegundos), o tempo de transmissão de pacotes de autorização de 4,5 ms e o tempo de sincronização de pacote de 2 ms. Estes parâmetros são usados para realizar a comparação com o modelo teórico apresentado em (Motoyama 2014).

Um pacote gerado em cada sensor segue uma distribuição exponencial negativa de média  $1/\lambda$ . Para um melhor resultado estatístico os primeiros 10000 pacotes são descartados em cada nó sensor.

A carga de entrada,  $S_1$ , é definida como

$$S_1 = \frac{M\lambda E\{X\}}{R_1} \quad (1)$$

onde  $M$  é o número de sensores,  $\lambda$  é a taxa média de chegada de pacotes,  $E\{X\}$  representa o tamanho médio do pacote e  $R_1$  é a capacidade do canal.

Como critério de desempenho utiliza-se o tempo médio de transferência de pacotes que é obtido com a soma do tempo médio de espera de pacotes na fila com o tempo médio de transmissão de pacotes em cada nó sensor. Outro parâmetro de desempenho é o tempo médio do ciclo onde cada ciclo é adicionado ao se inspecionar todos os nós sensores de um *sink*.

Foi considerado que o buffer para armazenamento tem tamanho infinito, isto é, sem perdas, e a transmissão dos pacotes é realizada de forma exaustiva. Dessa forma, o *buffer* será sempre esvaziado quando for inspecionado.

### 4.3. Modelo Teórico

A análise para o caso de buffer infinito é baseada nos mesmos pressupostos usados em (Motoyama 2013), isto é, a distribuição de Poisson de taxa  $\lambda$  pacotes/s para saída de cada nó sensor e uma distribuição determinística de tamanho de pacotes com media  $E\{X\}$  é adotada em todos os nós sensores. A capacidade do canal a partir do nó sensor para o nó *sink* é  $R_1$  bits/s e, do *sink* para o nó *master* (ou vice-versa) é  $R_x$  bits/s. O número de nós sensores de cada grupo será indicado por  $M$  e o número de nós *sinks* por  $N$ .

#### 4.3.1. Modelo Teórico Primeiro Nível

A seguinte expressão pode ser escrita para o caso de *buffer* infinito. O tempo médio do ciclo é dado por

$$T_{c1} = \frac{Mw}{(1 - S_1)} \quad (2)$$

$w$  representa o tempo de percurso, isto é, é o tempo de autorização somado ao tempo de sincronização, correspondente ao tempo de passagem de um nó sensor ao outro nó sensor, no processo de *polling*.

O tempo de espera no *buffer* no primeiro nível é dado por (Motoyama 2014)

$$E\{W_1\} = \frac{Mw(1 - S_1 / M)}{2(1 - S_1)} + \frac{S_1 E\{X\}}{2R_1(1 - S_1)} \quad (3)$$

para o tamanho determinístico do pacote.

O tempo de transferência para o primeiro nível é dado por

$$E\{T_1\} = \frac{E\{X\}}{R_1} + E\{W_1\} \quad (4)$$

Para ilustração das equações acima, os mesmos valores numéricos de (Motoyama 2013) serão usados. O tamanho do pacote  $E\{X\} = 900$  bits, o número de sensores  $M = 10$ , a capacidade do canal a partir dos nós sensores até o nó *sink* ou vice-versa  $R_1 = 20$  kbps e o tamanho do pacote de autorização é 10% do pacote de dados  $E\{X\}$ . Além disso, o tempo de percurso será considerado 6,5 milissegundos.

### 4.3.2. Modelo Teórico Segundo Nível

Uma vez que não há perda de pacotes no primeiro nível, o modelo de desempenho para o segundo nível será como mostrado na Figura 31 (Motoyama 2014).

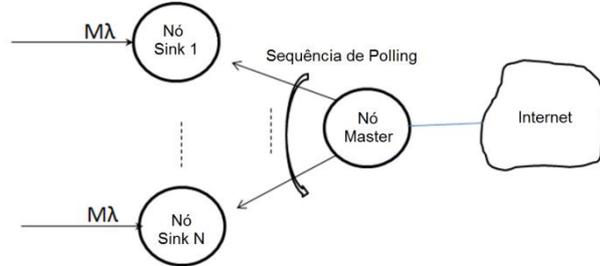


Figura 15. Modelo de desempenho para o segundo nível para buffer infinito.

O tempo médio do ciclo para este caso é dado por:

$$T_{c2} = \frac{Nw_x}{(1 - S_x)}, \quad (5)$$

onde N é o número de nós sink,  $w_x$  é o tempo de percurso para a transmissão do pacote de autorização mais o tempo de sincronização e  $S_x$  é dada por:

$$S_x = \frac{NM\lambda E\{X\}}{R_x} = NS_1 \frac{R_1}{R_x} \quad (6)$$

onde  $R_1$  é a capacidade de transmissão do primeiro nível, o símbolo  $R_x$  representa a capacidade de transmissão do segundo nível e  $S_1$  é dada por (1).

A condição de estabilidade é dada por:

$$S_x < 1 \Rightarrow NM\lambda E\{X\} < R_x. \quad (7)$$

O tempo de espera no buffer do segundo nível é dado por (Motoyama 2014):

$$E\{W_2\} = \frac{Nw_x(1 - S_x/N)}{2(1 - S_x)} + \frac{S_x E\{X\}}{2R_x(1 - S_x)}, \quad (8)$$

para o comprimento do pacote determinístico.

O tempo de transferência dos pacotes para o segundo nível é dado por

$$E\{T_2\} = \frac{E\{X\}}{R_x} + E\{W_2\}. \quad (9)$$

Considera-se a capacidade de 20 kbps para o primeiro nível e para o segundo nível as seguintes capacidades: 40 kbps, 100 kbps e 250 kbps. Na literatura as capacidades mais frequentemente citadas são 19,2 kbps e 38,4 kbps (Crossbow 2014), 250 kbps (Sichitiu

2004). Estas capacidades são sempre utilizadas no primeiro nível nas referências citadas. Uma vantagem da estrutura hierárquica é que as capacidades do primeiro e do segundo nível podem ser independentes, de modo que um link de alta capacidade pode ser usado no segundo nível.

#### 4.4. Descrição do Simulador

Os dados para a simulação são inseridos nos campos da aba *Source/Input* conforme mostrado na Figura 15 no quadro *Input* onde estão disponíveis os campos de texto para entrada dos parâmetros que devem ser fornecidos: a quantidade de pacotes a serem gerados, o tamanho médio do pacote e os pacotes a serem descartados.



Figura 16. Campos de texto para a entrada dos parâmetros.

Na Figura 16, é mostrado o quadro *Sources* onde é possível escolher qual o método gerador dos tempos dos pacotes que podem ser: *Exponencial Negativa* ou *On/Off*.

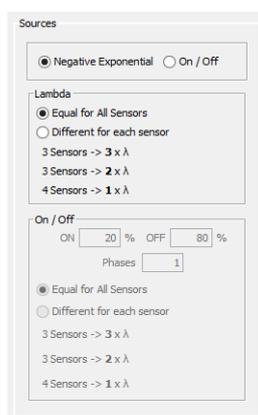


Figura 17. Opção de tipo de gerador de pacotes.

Na Figura 17, são mostrados os campos de entrada no quadro *Times* para os valores dos tempos de: transferência, serviço, autenticação, sincronização e de passada que podem ser definidos manualmente ou calculados automaticamente a partir do tempo de transferência estimado. Os valores para os níveis 1 e 2 podem ser diferentes conforme o modelo de simulação proposto.

**Figura 18. Campos para definição dos tempos nos níveis 1 e 2.**

Na aba *Process* devem ser definidos para o nível 1 e 2: O tipo do buffer (único, tamanho fixo ou infinito), a técnica de *polling* utilizada (Exaustiva ou não-exaustiva) e a faixa de carga do simulador que pode variar de 0,1 a 0,9 conforme mostrado na Figura 18.

**Figura 19. Opções de buffer, técnica de polling e intervalo de carga.**

Na Figura 19, é exibida a aba *Output* que possibilita que a escolha de quais gráficos serão gerados pelo simulador além de novas séries comparativas que podem ser adicionadas manualmente ou a partir de um arquivo. As saídas também incluem a opção de geração de arquivos com os dados da simulação.

Charge	Time (ms)
0.1	58
0.2	70
0.3	102
0.4	157
0.5	300
0.6	350
0.7	450
0.8	600
0.9	800

**Figura 20. Opções de saídas do simulador.**

Após definir os dados necessários para a simulação o processo pode ser iniciado quando o botão *Simulate* for pressionado. Ao término da simulação poderão ser geradas diversas saídas do tipo gráficos e/ou em arquivo de texto conforme selecionado pelo operador para análises posteriores. Na Figura 20, é exibido um gráfico de tempo médio de transferência do pacote que é gerado pelo simulador.



Figura 21. Gráfico de tempo médio.

O botão *Default Values* carrega os dados para uma simulação pré-definida como padrão.

#### 4.4.1. Visão geral do simulador

O programa trabalha com o paradigma de programação orientada a objetos. Possui os pacotes:

- *view* que contém a camada de interação com o usuário
- *model* que contém as classes modeladoras dos gráficos e tabelas
- *control* que contém o motor do simulador com as classes:
  - *Packet* com definições de como cada pacote deve ser gerado
  - *Queue* com as definições de cada fila de pacotes e das operações a serem realizadas com os pacotes que receberem atendimento.
  - *Polling* é a classe principal do simulador que contém as rotinas do processo de atendimento de cada pacote e a marcação dos tempos

em cada etapa do ciclo de vida do pacote desde sua geração até o momento em que ele é atendido no nível 2.

#### 4.4.2. Funcionamento do Simulador

Quando o operador clicar no botão *Simulate* os dados preenchidos serão usados pela classe *polling* para criar e executar a simulação e produzir resultados como gráficos e/ou arquivos.

O simulador trabalha em etapas divididas por cargas. Assim para uma simulação com cargas de entrada variando de 0,1 a 0,9 serão executadas 9 etapas utilizando os valores inseridos na tela de entrada de dados. Em cada etapa o tempo do relógio do simulador é zerado bem como os tempos médios de espera por atendimento do pacote, o tempo médio de ciclo de *polling*, a quantidade de ciclos realizados e o tempo total de espera dos pacotes gerados. A Figura 21 exibe o código fonte do simulador que realiza as seguintes operações:

- É determinada a taxa de chegada  $\lambda = ((\text{carga} * \text{capacidade do canal}) / (\text{tamanho médio do pacote} * \text{quantidade de sensores}))$
- É criado um grupo de filas de pacotes do tamanho especificado pelo operador representando os sensores assim como uma nova fila *sink* para receber, pelo processo de *polling*, os pacotes do grupo.

```
//Mudar a carga para obter novos pontos do gráfico
for (s = sMin; s <= sMax; s++) {
    timeClock = 0;
    timeTotalWait = 0;
    timeMeanCycle = 0;
    timeMeanWait = 0;
    qtCycles = 0;
    charge = (s / 10f);
    lambda = ((charge * r) / (ex * qtSensor));
    Queue sink1 = new Queue();
    Queue[] sensorsGrupol = new Queue[qtSensor];
//Segue o código para criação e consumo dos pacotes
}
```

Figura 22. Código fonte de criação das filas de pacotes para uma carga específica.

- Para cada fila do grupo criado são gerados os pacotes definidos pelo operador e é feito o descarte da quantidade também especificada na tela de entrada de dados. Cada pacote gerado é enfileirado por ordem de criação

em sua respectiva fila (sensor) e recebe os atributos de: tempo de chegada no sensor, número do sensor, ordem no sensor, número do *sink* e carga conforme exibido no código fonte da Figura 22.

```
for (int i = 0; i < qtSensor; i++) {
    for (int j = 0; j < descarte; j++) {
        timeArrival = ((-Math.log(Math.random()) / lambda)); //NOP
    }
    sensorsGrupol[i] = new Queue();
    for (int j = 1; j <= qtPackets; j++) {
        timeArrival = ((-Math.log(Math.random()) / lambda));
        timeArrivalPacketSensor += timeArrival;
        sensorsGrupol[i].addPacket(
            new Packet(timeArrivalPacketSensor, (i + 1), j, 1, s));
    }
    timeArrivalPacketSensor = 0;
}
```

**Figura 23. Código fonte para criação das filas dos pacotes.**

- A seguir é realizado o processo de *polling* onde ocorre o consumo dos pacotes. Para garantir o atendimento de todos os pacotes do grupo de sensores, uma verificação é feita repetidamente de maneira que o processo só terminará quando todas as filas do grupo estiverem vazias. A Figura 23 apresenta o código fonte do consumo dos pacotes para cada fila não-vazia que realiza as seguintes ações:
  - Se o tempo do relógio do simulador for menor que o tempo de chegada do pacote de um sensor *k* do grupo, então o tempo do relógio é incrementado no tempo de passada do nível 1 especificado na tela de entrada de dados. Caso contrário, significa que o pacote já pode ser atendido e o tempo do relógio é incrementado com o tempo de serviço do nível 1 e o tempo de passada do nível 1. O pacote recebe o valor do tempo do relógio atual como o tempo de chegada a fila *sink* e o tempo de espera total dos pacotes é incrementado com o valor de espera do pacote atendido.
  - Quando o pacote é atendido ele também recebe a informação de qual é a sua ordem de atendimento em relação aos demais e a seguir é removido da fila do sensor *k* do grupo para a fila do *sink*.

```

// k é o numero do sensor começando do zero
int k = 0;
while (!zeroQueue(sensorsGrupo1)) {
    if (!sensorsGrupo1[k].vazia()) {
        if (timeClock < sensorsGrupo1[k].checkPacketSensor()) {
            timeClock += timeWalkL1;
        } else {
            timeClock += (timeServiceL1 + timeWalkL1);
            sensorsGrupo1[k].timeStampSink((float) timeClock);
            timeTotalWait += sensorsGrupo1[k].timeWaitL1();
            //SEQUENCE ON SINK
            sensorsGrupo1[k].getPacket().setSequenceSink(
                sink1.getPackets().size() + 1);
            sink1.addPacket(sensorsGrupo1[k].removePacket());
            //Segue para o modo exaustivo, se ativado
        }
    }
}
}

```

**Figura 24. Código fonte para o consumo dos pacotes de acordo com o tempo de chegada.**

- Se o modo exaustivo foi configurado na aba *Process*, o processo continua verificando se há um próximo pacote na fila do sensor k do grupo. Enquanto essa fila não estiver vazia e o tempo de chegada do pacote for menor ou igual ao tempo do relógio do simulador o pacote, então, é atendido e o tempo do relógio é incrementado com o tempo de serviço do nível 1 e o tempo de autenticação do nível 1. O pacote recebe o valor do tempo do relógio atual como o tempo de chegada a fila *sink* e o tempo de espera total dos pacotes é incrementado com o valor de espera do pacote atendido. O pacote também receberá a informação de qual é a sua ordem de atendimento em relação aos demais e a seguir é removido da fila do sensor k do grupo para a fila do *sink*. O código fonte deste processamento é exibido na Figura 24.

```

//exaustivo
if (!sensorsGrupo1[k].vazia() && exaustiveL1) {
    while (!sensorsGrupo1[k].vazia()
        && sensorsGrupo1[k].checkPacketSensor()
        <= (float) timeClock) {
        timeClock += (timeServiceL1 + timeAutenticL1);
        sensorsGrupo1[k].timeStampSink((float) timeClock);
        timeTotalWait += sensorsGrupo1[k].timeWaitL1();
        sensorsGrupo1[k].getPacket().setSequenceSink(
            sink1.getPackets().size() + 1);
        sink1.addPacket(sensorsGrupo1[k].removePacket());
    }
}
}

```

**Figura 25. Código fonte do modo exaustivo de consumo.**

- Quando todos os pacotes do grupo forem atendidos para a carga e *sink* específicos, alguns valores serão processados para análise como: o tempo médio de espera do pacote e o tempo médio do ciclo para a criação dos gráficos por exemplo. O código fonte desse processamento é exibido na Figura 25.

```
k++;  
if (k == (sensorsGrupo1.length)) {  
    qtCycles++;  
    k = 0;  
}  
timeMeanWait = timeTotalWait / sink1.getPackets().size();  
timeMeanCycle = (float) timeClock / qtCycles;
```

**Figura 26. Código fonte do cálculo do tempo médio de espera e tempo médio do ciclo.**

Nesse simulador, foram utilizadas duas filas *sink*, então o processo anterior de criação e consumo prossegue mantendo a carga atual, zerando os valores de tempo e contagens e criando novas filas de pacotes para um novo grupo de sensores e uma nova fila *sink*. O processo de criação e consumo de pacotes ocorre da mesma forma como apresentado anteriormente.

Ainda na mesma carga, ao consumir todos os pacotes do segundo grupo de sensores o processo vai para o segundo nível e uma fila *master* é criada. Nesse processo os pacotes das filas *sinks* são atendidos de maneira análoga ao primeiro nível e são transferidos para a fila *master* de forma exaustiva conforme mostra o código fonte da Figura 26.

```

while (!(sink1.vazia() && sink2.vazia())) {
    if (!sink1.vazia()) {
        if (timeClock < sink1.checkPacketSink()) {
            timeClock += timeWalkL2;
        } else {
            timeClock += (timeServiceL2 + timeWalkL2);
            sink1.timeStampMaster((float) timeClock);
            timeTotalWait += sink1.timeWaitL2();
            timeTotalWaitL1L2 += sink1.timeWaitL1L2();
            sink1.getPacket().setSequenceMaster(
                master.getPackets().size() + 1);
            master.addPacket(sink1.removePacket());
            //Segue para o modo exaustivo, se ativado
        }
    }
    }//Verifica se a fila sink2 está vazia
    if (!sink2.vazia()) { //segue o processamento...
    }
} //Processa os dados para os gráficos e/ou arquivos

```

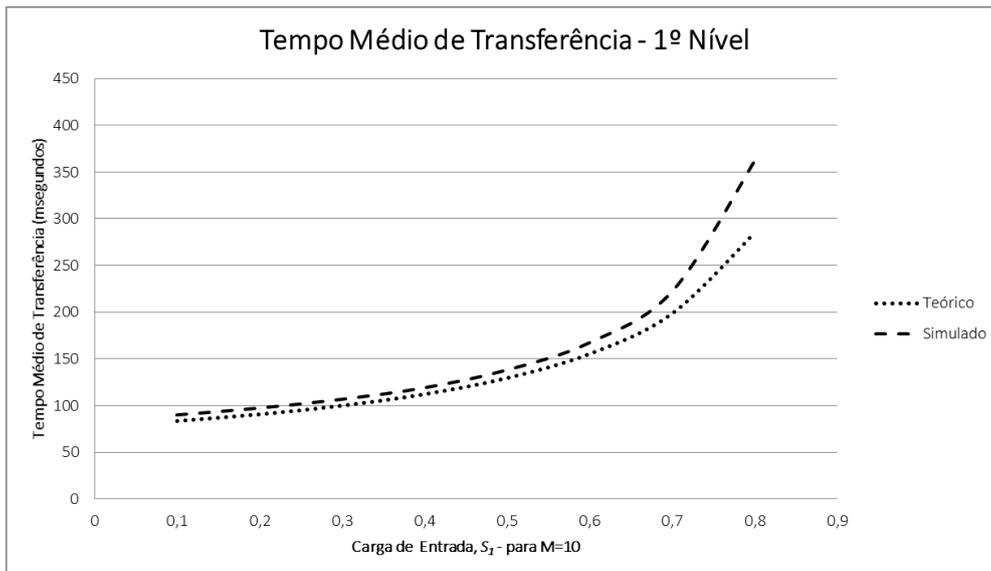
**Figura 27. Código fonte do consumo dos pacotes no segundo nível.**

Como os tempos dos processamentos das etapas de *polling* para o segundo nível podem ser especificados com valores diferentes, os cálculos de incremento do tempo do relógio recebem outros valores. Ao final do processo, quando todos os pacotes das filas *sink1* e *sink2* forem atendidos, alguns valores serão processados para análise como: o tempo médio de espera do pacote, o tempo médio do ciclo e o tempo gasto nos níveis 1 e 2 para a criação dos gráficos.

Todo o processo descrito anteriormente se repetirá para cada carga configurada do simulador. Com isso, uma análise do comportamento do tempo de atendimento em função da carga do sistema poderá ser realizada com os gráficos e arquivos produzidos pelo simulador.

#### 4.5. Análise de Resultados

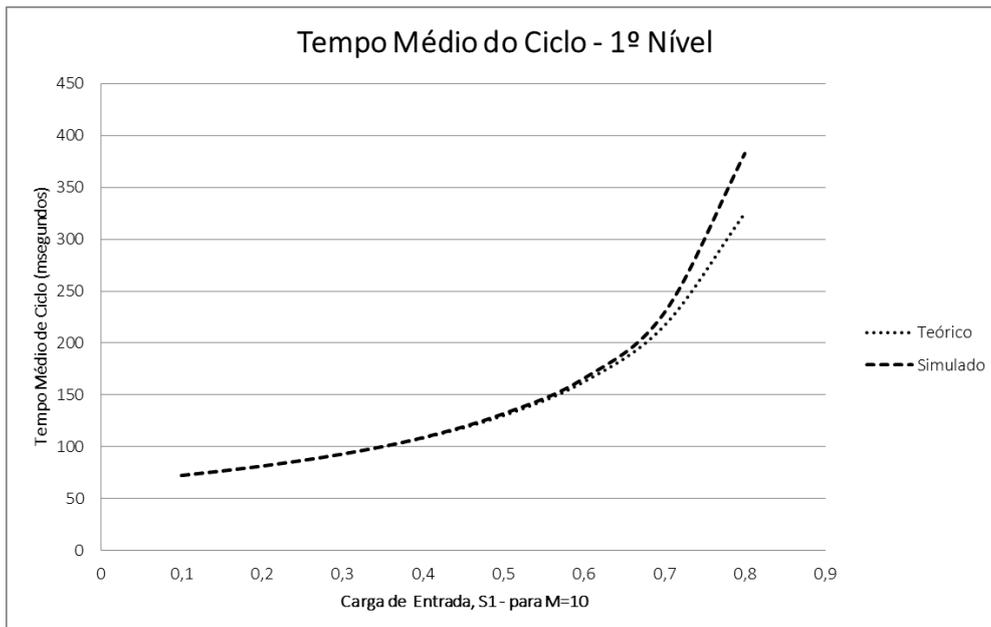
A Figura 27 mostra os resultados obtidos na simulação comparados com os resultados teóricos extraídos de (Motoyama 2014) no primeiro nível para o tempo médio de transferência. Pode-se observar que os resultados obtidos na simulação estão próximos do teórico até a carga de 0,5. Para a carga superior a 0,5, as curvas da simulação e teórica são divergentes. Considerando que quando a carga é alta, acima de 0,5, o esquema de *polling* estará operando em condições instáveis, são esperados resultados diferentes para as curvas da simulação e teórica.



**Figura 28. Tempo médio de transferência do pacote no primeiro nível.**

A Figura 28 mostra os resultados para o tempo médio do ciclo de *polling* após a varredura de todos os sensores no primeiro nível, para  $R_1 = 20$  kbps. Neste caso, para a carga de entrada variando de 0,1 a 0,6 e os resultados obtidos na simulação são próximos aos teóricos. Para a carga maior que 0,6 o mesmo fenômeno observado para o tempo médio de transferência ocorre, isto é, as curvas são divergentes.

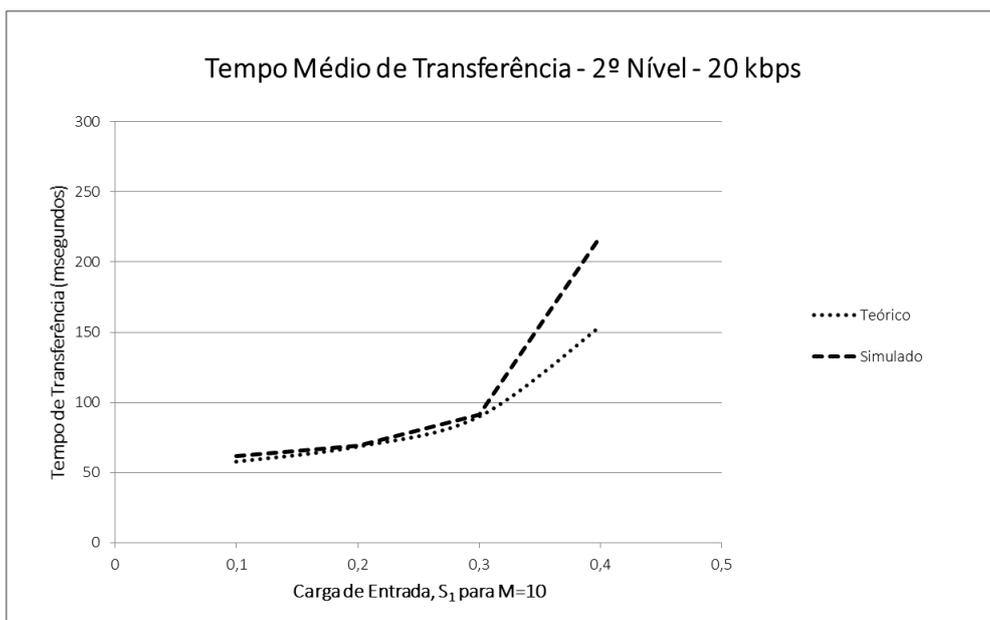
Para a análise do segundo nível deve-se observar que na técnica de *polling* exaustiva os pacotes são armazenados no buffer de cada nó sensor, aguardam a sua vez para serem atendidos e quando um nó sensor é consultado todos os pacotes são transmitidos para o nó *sink* nesse mesmo atendimento.



**Figura 29. Tempo médio do ciclo no primeiro nível.**

No modelo teórico a chegada dos pacotes transmitido para o *sink* ocorre através de distribuição exponencial negativa. A distribuição exponencial negativa é considerada apenas no nó de saída de um sensor nesta simulação. A Figura 29 mostra a comparação dos resultados obtidos por simulação e por meios teóricos para o tempo médio de transferência. As curvas são bastante próximas, o que significa que a abordagem utilizada no modelo teórico é muito razoável.

As curvas da Figura 29 mostram que o sistema de *polling* pode não ser eficiente caso a carga seja maior que 0,3 para certos parâmetros de entrada. Nota-se que os tempos de transferência se tornam proibitivamente grandes, o que significa que o tempo de espera de pacotes em cada buffer do nó sensor também aumentou bastante.

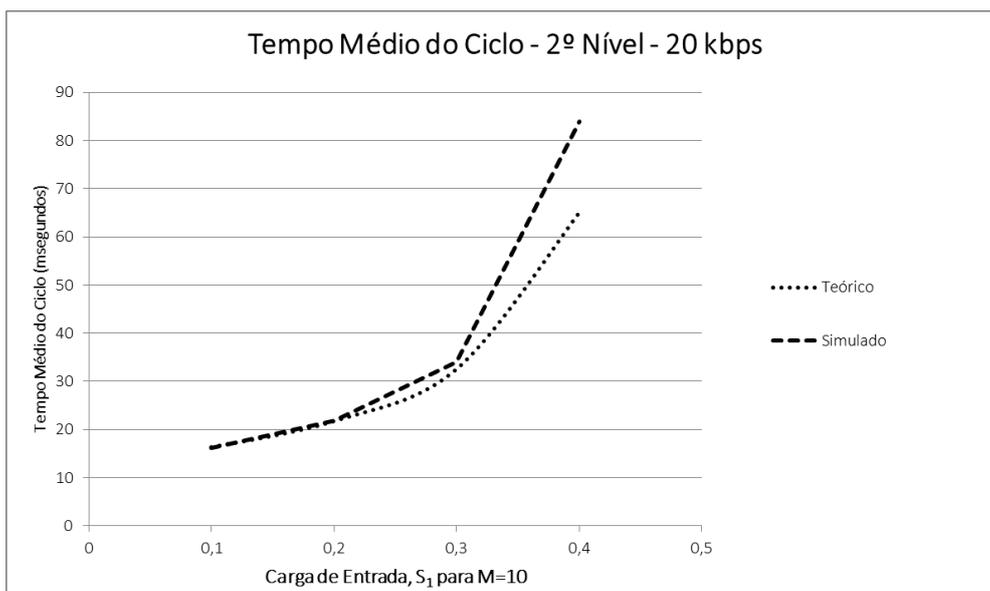


**Figura 30. Tempo médio de transferência do pacote no segundo nível.**

A Figura 30 mostra o comportamento das curvas para o tempo médio do ciclo de *polling* no segundo nível. As curvas mostram que para a carga de até 0,3 os valores médios do ciclo são muito próximos. Uma pequena divergência surge quando a carga está acima de 0,3, mas não é significativa.

Também se observa que, quando a carga está acima de 0,3, um pequeno incremento da carga de entrada produz um grande tempo de ciclo médio aproximando-se rapidamente para o infinito. Isto demonstra que o segundo nível possui alta sensibilidade quanto à carga de entrada.

A conclusão geral que se chega para obter uma operação estável no primeiro e segundo níveis do esquema de *polling* hierárquico com os parâmetros dados é que o sistema deve operar com uma carga inferior a 0,3, devido a taxa de transferência de 20 kbps ser muito baixa principalmente para o segundo nível, levando em consideração os dados de entrada.



**Figura 31. Tempo médio do ciclo no segundo nível.**

Também se observa, quando a carga de entrada está acima de 0,4, que um pequeno incremento na carga produz valores exponenciais nos tempos de transferência e do ciclo como pode ser visto nas Figuras 29 e 30, ou seja, uma alta sensibilidade do segundo nível quanto à carga de entrada.

#### **4.6. Taxa de Transmissão Diferente no Segundo Nível**

Como mostrado na seção anterior, o segundo nível tem alta sensibilidade para a carga de entrada do primeiro nível. Tendo em vista que geralmente o aumento de largura de banda denota em aumento da potência de transmissão e para atender as especificações de órgãos reguladores de transmissão de rádio, evitando assim danos no corpo humano, sugere-se um link máximo de 20 kbps de capacidade de largura de banda no primeiro nível, já que os sensores são implantados sob ou muito próximos à pele.

Pelo proposto nos dispositivos do segundo nível, esses podem estar mais afastados do corpo e no intuito de melhorar o desempenho do segundo nível, um link com capacidade maior que 20 kbps pode ser usado. Neste trabalho, a estrutura hierárquica estudada pode usar diferentes capacidades para primeiro e segundo níveis visando melhorar o desempenho do sistema.

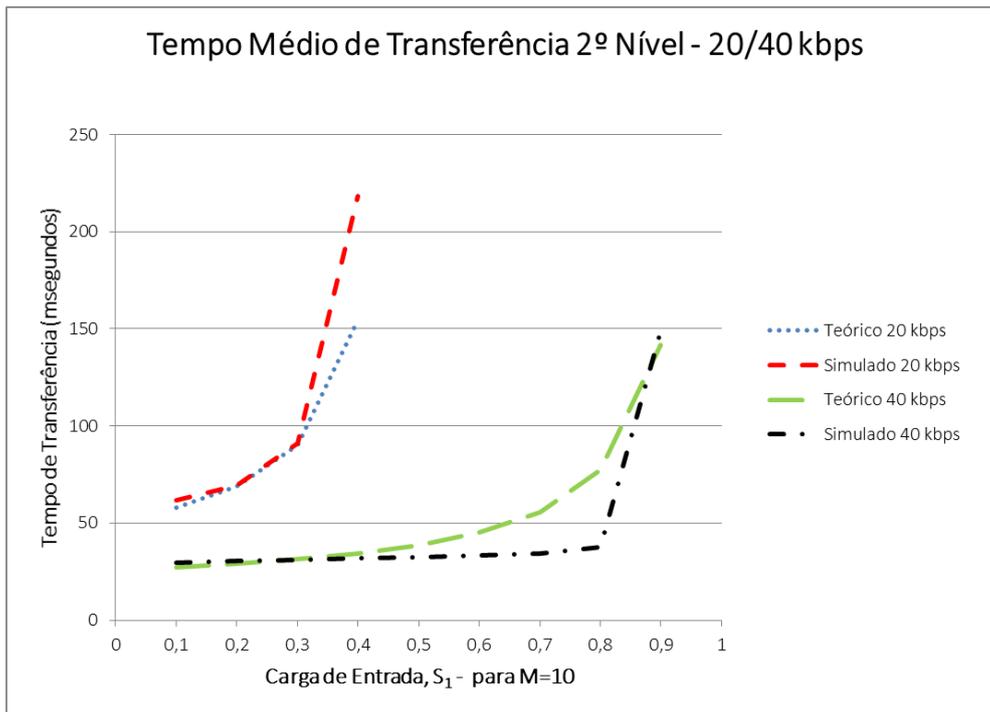
Nesta dissertação, análises teóricas e simulações computacionais foram realizadas para demonstrar o desempenho do segundo nível com diferentes capacidades de largura de banda /link.

A Tabela 3 mostra os parâmetros usados para o segundo nível tanto para as análises teóricas como para as simulações computacionais. O tempo de autorização do pacote é calculado considerando que o pacote tem 10% do pacote médio de dados ( $E\{X\} = 900$  bits) e uma taxa de transmissão de 20 kbps, isto é,  $90/20 K = 4,5$  ms. O tempo de sincronização é aproximadamente 2 ms e o tempo de percurso (de um sensor para outro) é a adição do tempo de autorização com o tempo de sincronização. Os demais valores dos tempos para as outras capacidades apresentadas são calculados considerando uma proporção inversa à capacidade do link.

**Tabela 3. Parâmetros para o segundo nível**

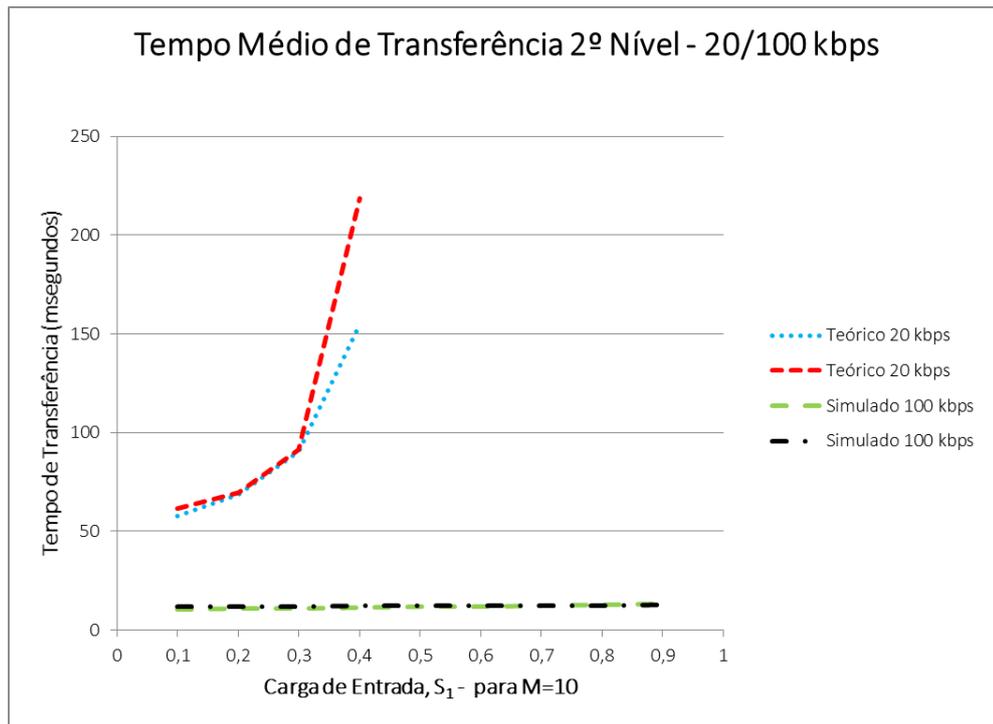
<b>Capacidade <math>R_x</math> (kbps)</b>	<b>Tempo de Autorização do Pacote (ms)</b>	<b>Tempo de Sincronização (ms)</b>	<b>Tempo de Percurso <math>w_x</math> (ms)</b>
20	4.5	2	6.5
40	2.25	1	3.25
100	0.9	0.4	1.3
250	0.36	0.16	0.52

Usando (5) e (6) e os parâmetros da Tabela 3 os tempos médios de transferência para várias capacidades de link do segundo nível podem ser calculados e simulados conforme mostrados na Figuras 32, 33, 34, 35 e 36. As figuras mostram que a limitação de desempenho do segundo nível usando a mesma capacidade de primeiro nível pode ser completamente superada usando maiores e diferentes capacidades de link.



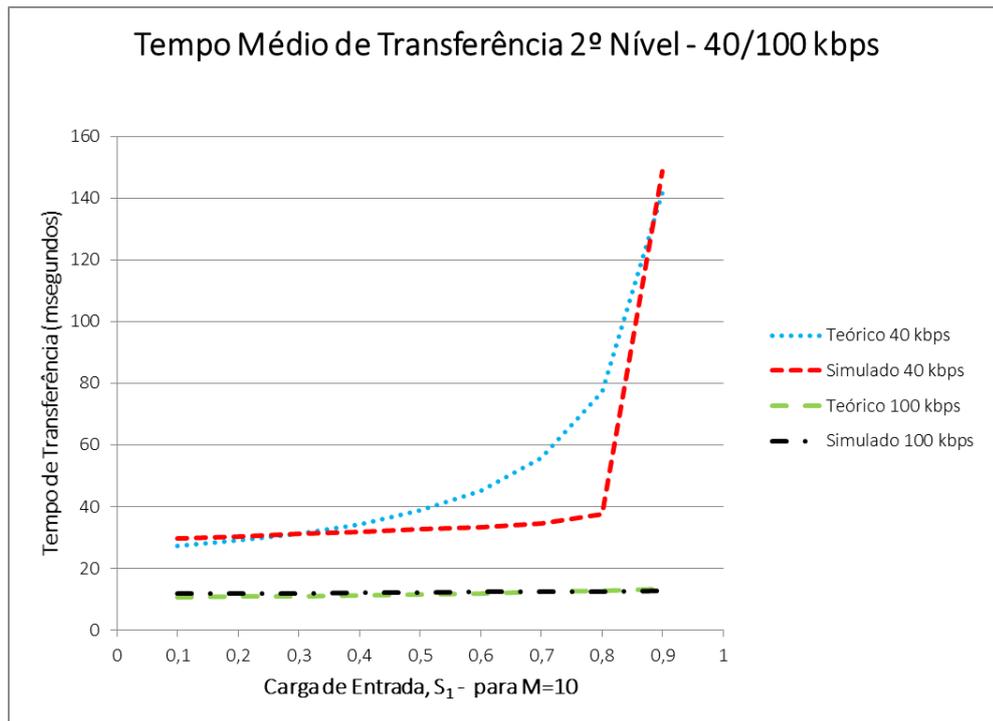
**Figura 32. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 40 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.**

Na Figura 32, com o sistema operando em 20 kbps, os resultados, tanto no teórico como no simulado, mostram que para cargas acima de 0,3 o sistema fica instável. Aumentando o link do segundo nível para 40 kbps a instabilidade passa a ser com cargas superiores a 0,8, mostrando que o uso do dobro de capacidade do primeiro nível o desempenho é otimizado em relação ao tempo médio de transferência. Os resultados obtidos através da simulação para 40 kbps mostram uma certa discrepância em relação aos valores teóricos para valores acima de 0,7. Entretanto, como o sistema já está em uma região de instabilidade, pode-se esperar alguma variação nos resultados teóricos e simulados.



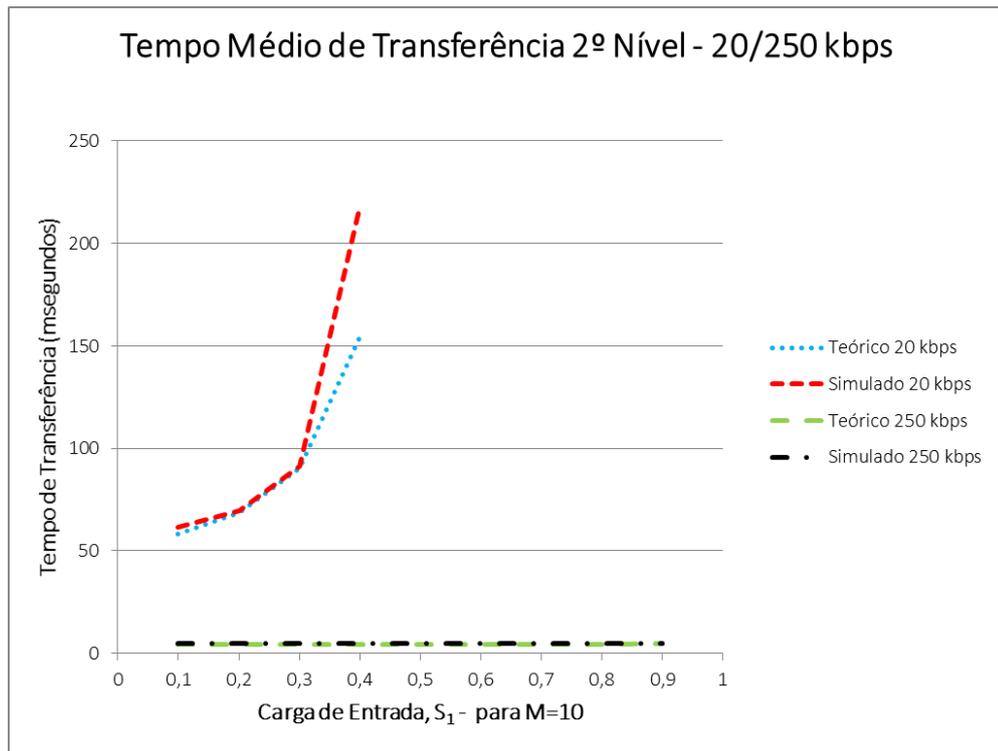
**Figura 33. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 100 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.**

A Figura 33 mostra os resultados obtidos com o link de 100 kbps e comparados com o link de 20 kbps. Como se observa, com o link de 100 kbps, o sistema permanece estável com cargas bem altas, diferente do link de 20 kbps que fica instável com cargas acima de 0,3. O tempo médio de transferência para 100 kbps fica quase constante e bem baixo, em torno de 10 ms.



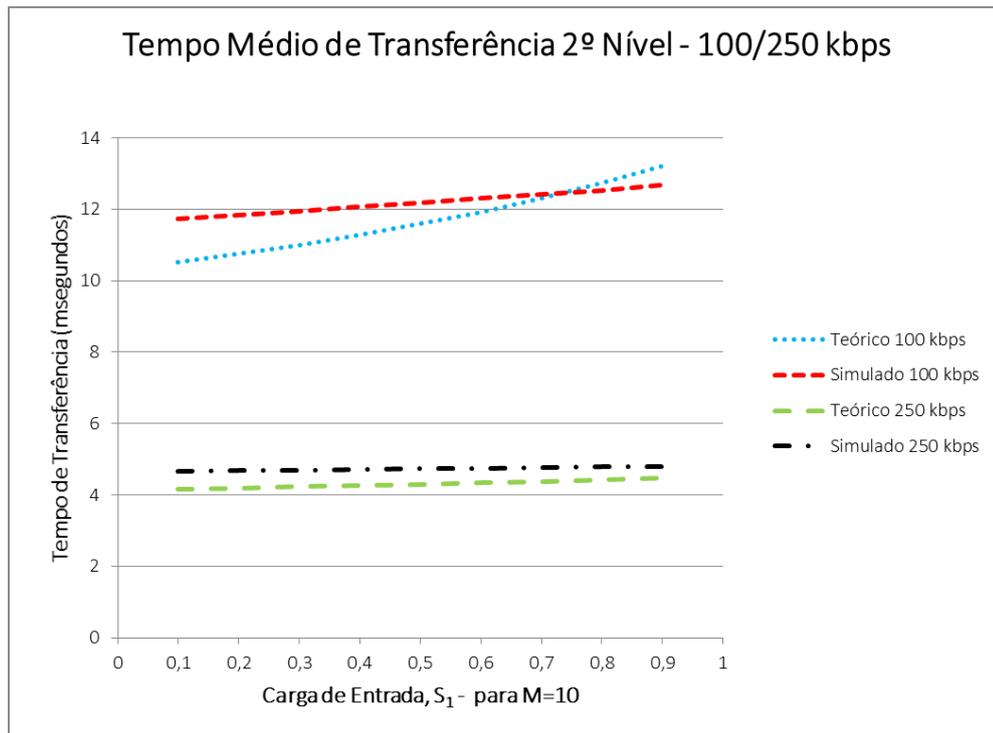
**Figura 34. Comparação de desempenho entre 40 kbps e 100 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.**

A Figura 34 mostra uma comparação de desempenho para o caso de links de 40 kbps e 100 kbps. A principal diferença é que com 40 kbps, a partir da carga 0,8 o teórico e o simulado passam a crescer e ficar instável, fato que não acontece com 100 kbps mesmo com cargas acima de 0,8. Além disso, para a capacidade do link de 100 kbps, o tempo de transferência é baixo se comparado com o link de 40 kbps.



**Figura 35. Comparação de desempenho entre 20 kbps e 250 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.**

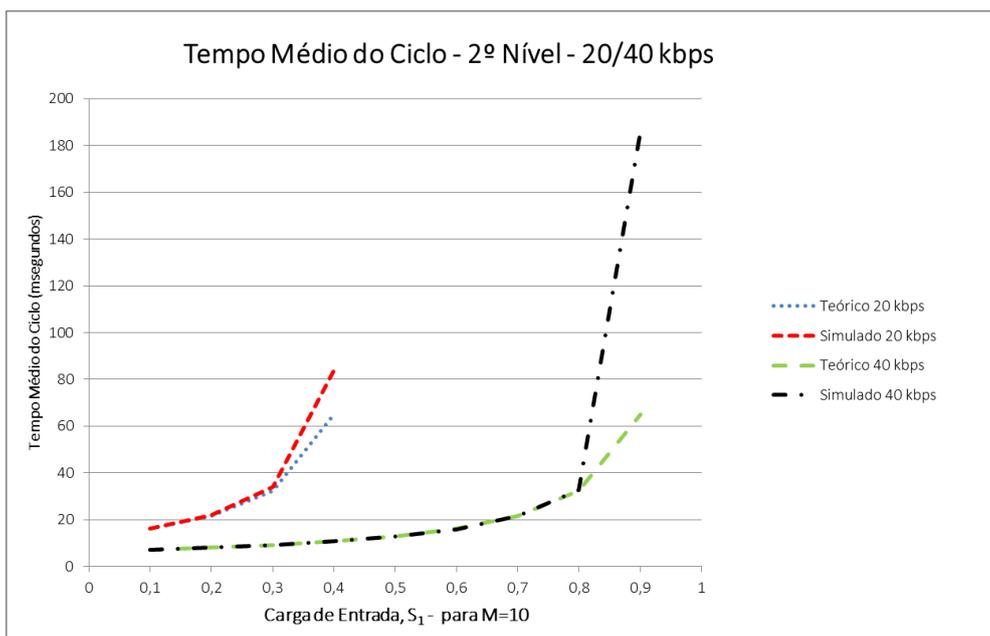
Na Figura 35 os links utilizados foram 20 kbps e 250 kbps o que apresentou um degrau enorme entre instabilidade e estabilidade do sistema de *polling* hierárquico para o segundo nível. Com 250 kbps os resultados, tanto do teórico quanto do simulado, são muitos semelhantes e próximos em relação ao tempo de transferência.



**Figura 36. Comparação de desempenho entre 100 kbps e 250 kbps para o tempo médio de transferência de transmissão no segundo nível.**

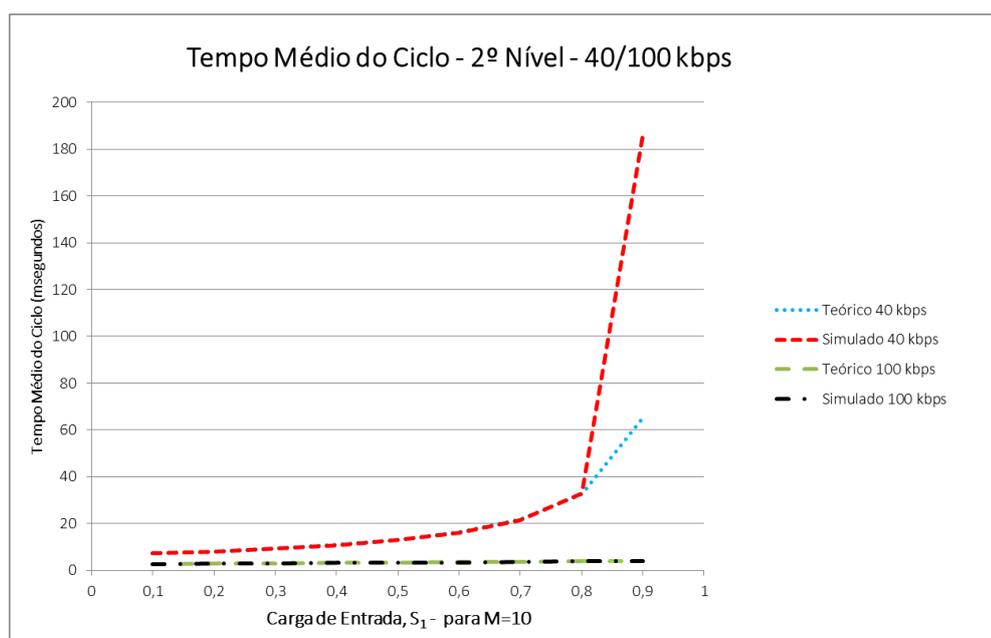
A Figura 36 mostra uma comparação de desempenho de links de 100 kbps e 250 kbps. No caso de 100 kbps, os tempos médios de transferência tanto no teórico como no simulado ficam bem próximos, principalmente com cargas altas entre 0,6 e 0,9. Para o link de 250 kbps, o tempo de transferência é muito baixo e quase constante para qualquer carga de entrada.

Com as fórmulas, o programa e os parâmetros da Tabela 3 para o segundo nível, os tempos médios de ciclo para várias capacidades de link do segundo nível podem ser calculados e simulados conforme mostrados nas Figura 37, 38, 39, 40 e 41. Estas Figuras mostram que as curvas dos tempos médios de ciclo têm o mesmo comportamento dos tempos médios de transferência, o que representa ganho de desempenho no tempo médio de ciclo semelhante ao ganho de desempenho do tempo médio de transferência.



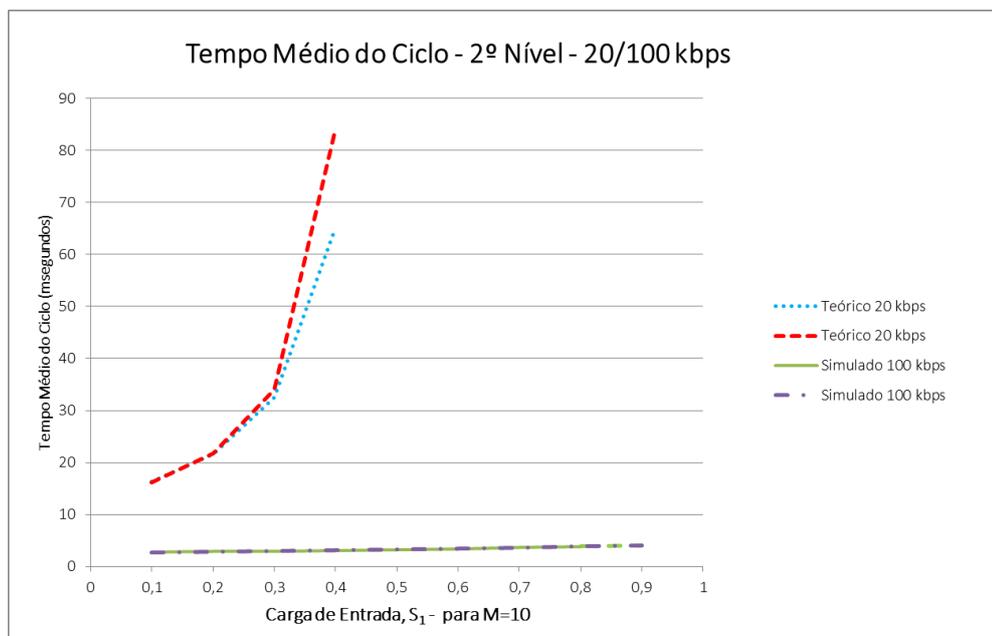
**Figura 37. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 40 kbps para o tempo médio do ciclo de transmissão no segundo nível.**

A Figura 37 mostra o caso dos links de 20 kbps e 40 kbps, tanto para a análise teórica como para o simulador computacional. Pode-se observar que o desempenho é otimizado em relação ao tempo médio de ciclo. O sistema de *polling* hierárquico pode operar sem instabilidade com até 0,3 de carga para 20 kbps e até 0,8 de carga para 40 kbps.



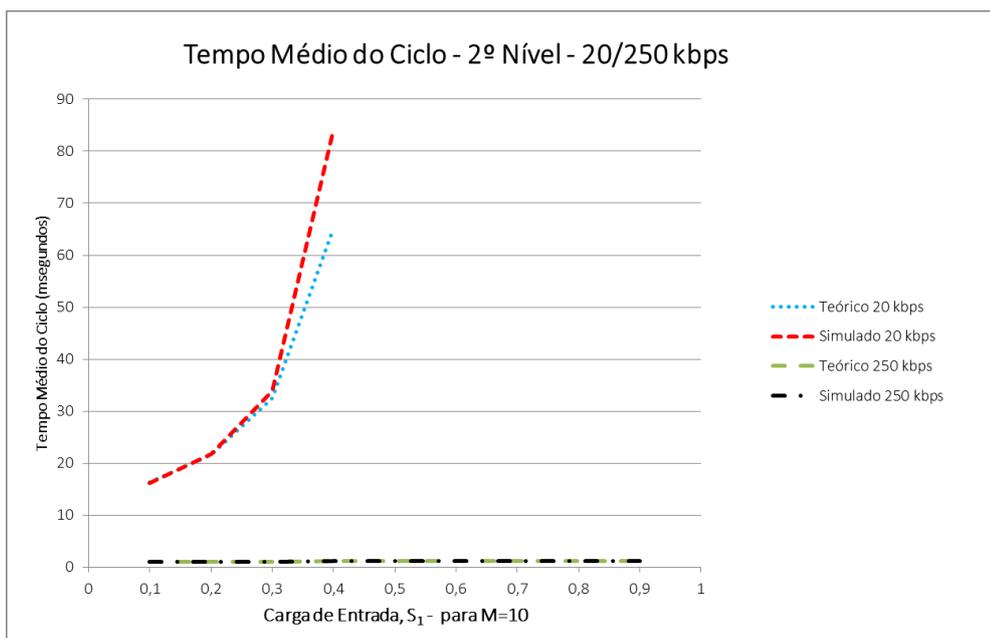
**Figura 38. Comparação do desempenho entre 40 kbps e 100 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível.**

Na Figura 38 o incremento no desempenho ocorre com o link de 100 kbps em comparação com o de 40 kbps. No link de 40 kbps a partir da carga 0,8 o teórico e o simulado passam a crescer e ficar instável. No link de 100 kbps com cargas baixas ou altas o tempo médio de ciclo permanece constante.



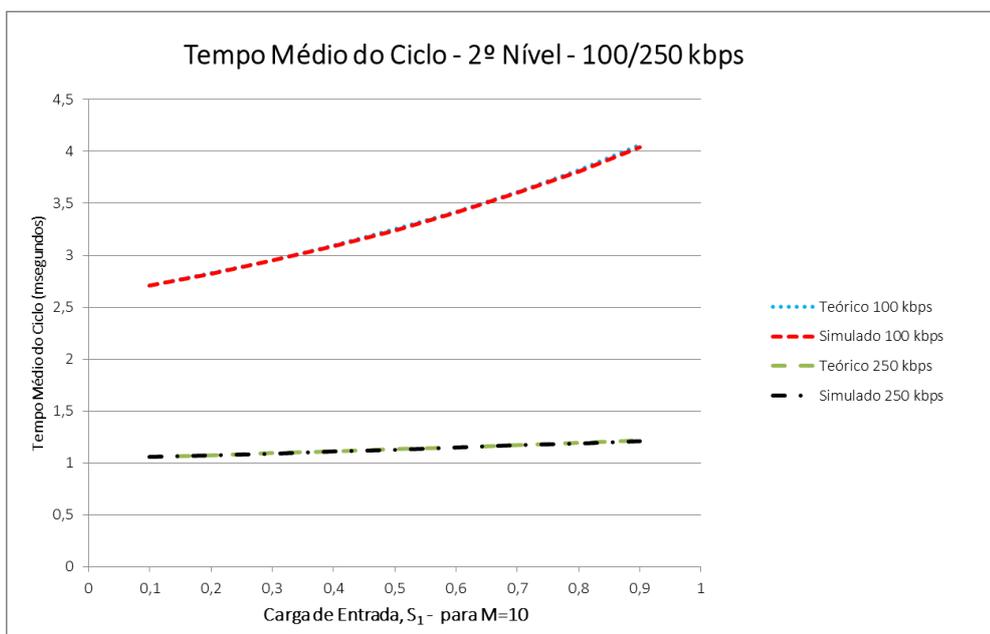
**Figura 39. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 100 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível.**

Na Figura 39 o tempo médio de ciclo é comparado entre os links de 20 kbps e 100 kbps. Para a capacidade do link de 100 kbps o tempo de ciclo é baixo se comparado com o link de 20 kbps.



**Figura 40. Comparação do desempenho entre 20 kbps e 250 kbps para o tempo médio do ciclo de transmissão no segundo nível.**

Para a capacidade de 250 kbps, conforme mostrado na Figura 40, o tempo de ciclo é quase constante para qualquer carga de entrada, tanto na análise teórica quanto na simulação computacional.



**Figura 41. Comparação do desempenho entre 100 kbps e 250 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível.**

Na Figura 41 a comparação do desempenho entre 100 kbps e 250 kbps para o tempo médio do ciclo no segundo nível revela uma proporcionalidade direta com relação ao aumento do link no segundo nível.

Os resultados obtidos nas Figuras 32, 33, 35, 37, 39 e 40 podem ser comparados com os resultados apresentados em (Motoyama, 2013) e (Motoyama, 2014). O estudo do desempenho apresentado em (Motoyama, 2013) e (Motoyama, 2014) considera a mesma taxa de transmissão de 20 kbps em ambos os níveis. Como resultado, o tempo médio de transferência e de ciclo do segundo nível foram muito sensíveis à carga de entrada. O segundo nível poderia operar em condição estável se menos de 0,4 da carga de entrada fosse aplicada no primeiro nível. As Figuras 32 e 37 mostram que simplesmente dobrando a taxa de transmissão do segundo nível faz com que a carga de entrada também seja dobrada para 0,8 para um funcionamento estável do segundo nível. Em altas taxas de transmissão a operação estável do segundo nível é quase que independente da carga do primeiro nível.

## 5. Conclusão

Uma estrutura hierárquica de esquema de acesso MAC utilizando a técnica baseada em *polling* foi analisada nesta dissertação. Os resultados obtidos por simulação para os tempos médios de transferência no primeiro nível da hierarquia foram comparados com os resultados teóricos, mostrando boa conformidade para cargas leves e algumas divergências para cargas elevadas. Para cargas elevadas o sistema de *polling* opera em condição instável, então alguma divergência é esperada. A mesma conclusão foi observada para o tempo médio de ciclo no primeiro nível. Os resultados para os tempos médios de transferência do segundo nível da hierarquia, apesar de alguma aproximação assumida no modelo teórico para este nível, mostraram uma boa conformidade entre a simulação e a teoria para toda a faixa da carga de entrada. Assim, conclui-se que o modelo teórico é um bom modelo. Os resultados para os tempos médios de ciclo do segundo nível mostraram que para uma carga de até 0,3 eles são muito próximos aos teóricos. Uma pequena divergência para a carga acima de 0,3 pode ser observada, mas não sendo significativa. Observou-se também que para um pequeno incremento da carga de entrada acima de 0,3 ocorre um grande incremento do tempo médio de ciclo. Isso mostra a elevada sensibilidade de segundo nível quanto à carga de entrada.

Para superar a sensibilidade do segundo nível para a carga de entrada um estudo utilizando diferentes e maiores capacidades de transmissão em segundo nível foi realizado. O estudo mostrou que utilizando o dobro da capacidade no segundo nível torna o sistema de *polling* estável durante quase toda a carga de entrada. Para a capacidade de 250 kbps os tempos de transferência e de ciclo são quase constantes para qualquer carga de entrada.

Em trabalhos futuros outros modelos de nós sensores que reflitam situações reais serão incorporados ao programa de simulação para estudar a capacidade do esquema de acesso MAC baseada em *polling* e estruturada hierarquicamente.

## Referências

- Akyildiz, I. F. and Su, W. and Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E. 2002. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* n. 38, Elsevier Science B.V. pp. 393-422.
- ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº 533, de 10 de setembro de 2009. Disponível em [www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2009/147-resolucao-533](http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2009/147-resolucao-533), acessado em 03 de julho de 2015.
- Bhargava, A. and Zoltowski, M. 2003. *Sensors and Wireless Communication for Medical Care*. Center for Education and Research Information Assurance and Security, Purdue University, West Lafayette, USA.
- Chen, M. and Gonzalez, S. and Vasilakos, A. and Cao, H. and Leung V. C. M. 2011. *Body Area Networks: A Survey*. *Mobile Network Application*, Springer. pp. 171-193.
- Crossbow. MicaZ Datasheet. Disponível em [www.openautomation.net/uploads/productos/micaz\\_datasheet.pdf](http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_datasheet.pdf), acessado em 18 de Setembro de 2014.
- Fang, G. and Dutkiewicz, E. 2009. BodyMAC: Energy Efficient TDMA-based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks. *The 9th International Symposium on Communication and Information Technologies*. Korea. pp. 1455.
- Gupta, S. K. S. and Lalwani, S. and Prakash, Y. and Elsharawy, E. and L. Schwiebert, L. 2003. Towards a propagation model for wireless biomedical applications. *ICC'03. IEEE International Conference on*, vol. 3, pp. 1993-1997.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2003. *Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. *Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks*.

- Lamprinos, I. E. and Prentza, A. and Sakka, E. and Koutsouris, D. 2005. Energy-efficient MAC Protocol for Patient Personal Area Networks. Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE-EMBS 2005. Shanghai. China.
- Latré, B. and Braem, B. and Moerman, I. and Blondia, C. and Demeester, P. 2010. A Survey on Wireless Body Area Networks, Computer Graphics: Developments in Virtual Environments. R. A. Earnshaw and J. A. Vince. Academic Press Ltd.. England. pp. 449-460.
- Marinkovic, S. and Spagnol C. and Popovici, E. 2009. Energy-Efficient TDMA-Based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks. Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM '09.
- Motoyama, S. 2012. Flexible *Polling*-based Scheduling with QoS Capability for Wireless Body Sensor Network. 37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, - LCN 2012, Clearwater, USA.
- Motoyama, S. 2013. Hierarchical Polling-based MAC scheme for Wireless Body Sensor Network. The 2013 International Conference on Wireless Networks - ICWN'13, Las Vegas, USA. p. 103-109.
- Motoyama, S. 2014. Performance of Hierarchical Polling-based MAC scheme for Wireless Body Sensor Network. The 2014 International Conference on Wireless Networks - ICWN'14, Las Vegas, USA, 2014, pp. 23-28.
- Omeni, O. and Wong, A. and Burdett A.J. and Toumazou, C. 2008. Energy Efficient Medium Access Protocol for Wireless Medical Body Area Sensor Networks. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, Volume: 2. Issue: 4.
- Paradiso, J. A. and Starner, T. 2005. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. IEEE Pervasive Computing, vol. 04, no. 1, pp. 18-27.
- Ruzzelli, A. G. and Jurdak, R. and O'Hare, G. M. and Stok, P. V. D. 2007. Energy-efficient multi-hop medical sensor networking. HealthNet '07: Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments. New York, USA, pp. 37-42.
- Sichitiu, M. L. 2004. Cross-Layer Scheduling for Power Efficiency in Wireless Sensor Networks. Proceedings of INFOCOM 2004, Hong Kong, pp. 1740-1750.

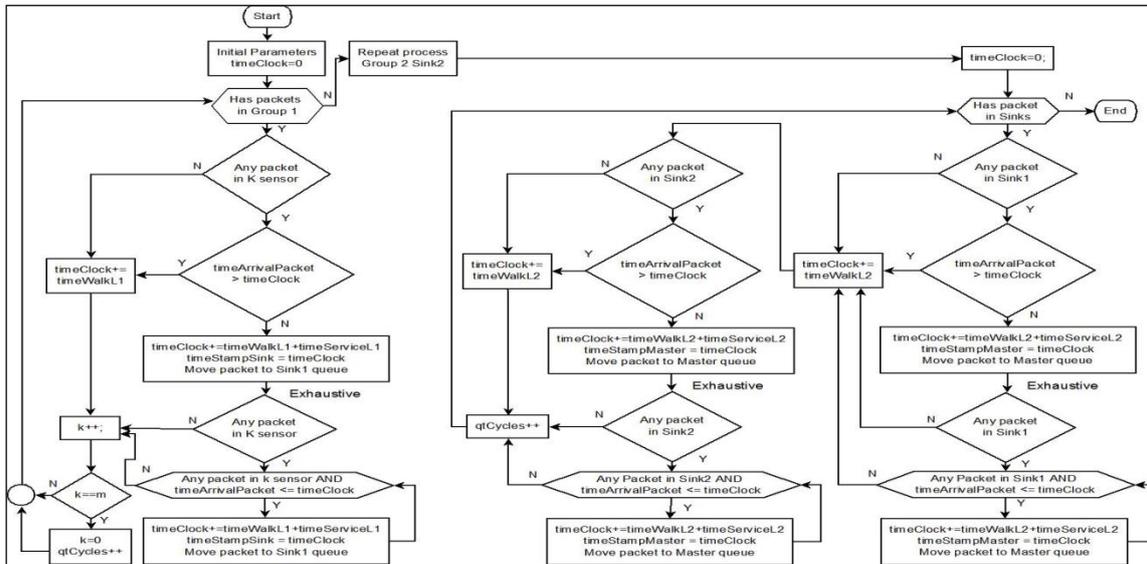
- Tang, Q. and Tummala, N. Gupta, S. K. S. and Schwiebert, L. 2005. Communication scheduling to minimize thermal effects of implanted biosensor networks in homogeneous tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 7, pp. 1285-1294.
- Thomazini, D. and Albuquerque P. U. B. 2009. *Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações*. 6ª Edição. São Paulo. Brasil. Editora Érica.
- Ullah, S. and Kwak K. S. 2010. Performance study of low-power MAC protocols for Wireless Body Area Networks. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops)*. IEEE 21st International Symposium.
- WHO - World Health Organization: Mobile health (mHealth) for tobacco control. Disponível em <http://www.who.int/tobacco/mhealth/en/>, Acessado em 01 de Julho de 2013.
- Yan, Z. and Liu, B. 2011. A context aware MAC protocol for medical Wireless Body Area Network Wireless. *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE Computer Society*. 7th International Communications and Mobile Computing Conference - IWCMC 2011, Vol.2, Istanbul, Turkey, p. 2133.
- Yuce, M. R. and Khan J. Y. 2012. *Wireless Body Area Networks - Technology, Implementation, and Applications*. Boca Raton, US. CRC Press. p. 1-17.

## Apêndice A - Simulador Computacional

Neste apêndice será mostrado resumidamente o sistema desenvolvido para obtenção dos dados necessários a realizar das comparações entre o modelo computacional e o modelo teórico apresentados nessa dissertação. A linguagem de programação escolhida para o desenvolvido do sistema foi o Java 1.7.0\_67, através da interface NetBeans IDE 7.4

O sistema de simulação e os códigos fontes estão disponíveis para download no endereço: <http://www.digianni.com.br>

A Figura 42 apresenta as principais partes do algoritmo desenvolvido para o simulador. O primeiro passo do algoritmo é a geração dos tempos de chegada dos pacotes (usando uma distribuição exponencial negativa) e em seguida armazenar em um atributo da classe chamada Packet. Cada novo pacote gerado é colocado em um fila FIFO (First In First Out) que representa um sensor. Dois outros atributos desta classe são: os tempos de relógio dos nós *sink* e *master* que serão obtidos durante a simulação. O passo seguinte é a verificação das filas dos sensores do Grupo1 em uma sequência de *polling* de modo que os pacotes de cada fila são processados de forma exaustiva. Cada pacote atendido recebe um time stamp e é movido para a fila *Sink1*. Todos os pacotes atendidos ficam em uma fila FIFO no *Sink1*. Em seguida, o processo se repete para o Grupo 2 de modo que os pacotes serão armazenados na fila do *Sink2*. O próximo passo é a verificação das filas *sinks* do segundo nível para atender os pacotes em *polling* de forma exaustiva. Cada pacote atendido recebe um time stamp e é movido para a fila *master*. Durante o processo de *polling* os tempos médios de transferência e do ciclo de *polling* entre outros parâmetros são calculados.



**Figura 42. Visão geral do algoritmo desenvolvido para a análise do desempenho do esquema MAC baseado em *polling* hierárquico.**

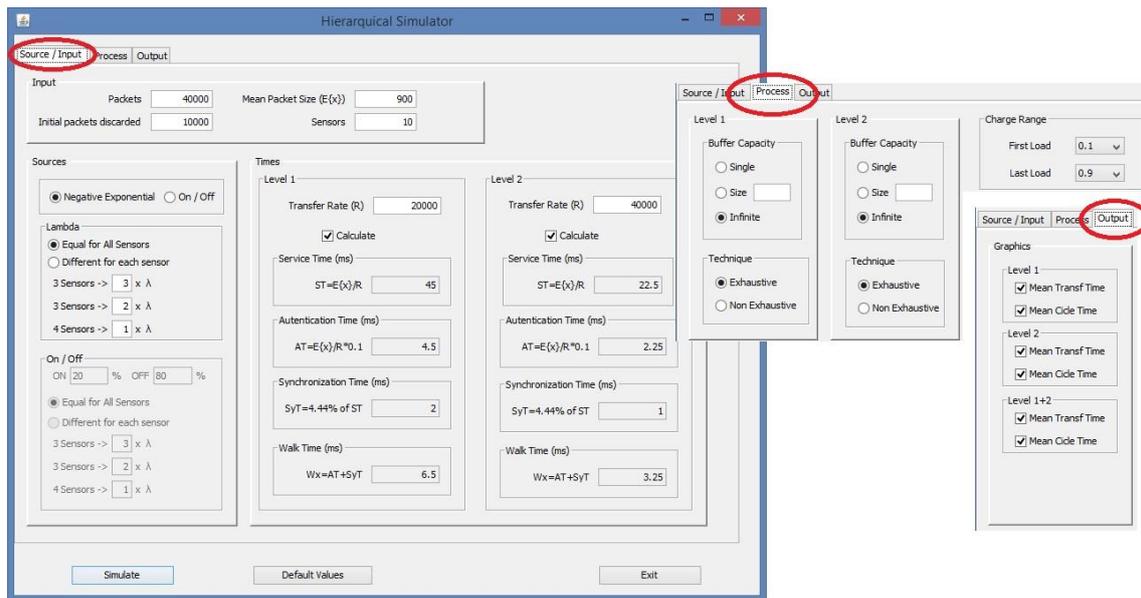
Em uma aplicação real a proposta de rede de sensores pode monitorar diferentes sinais biológicos do corpo tais como a temperatura, a pressão, entre outros, conforme mostrado na Figura 13. Uma vez que os sensores de uma WBAN têm capacidades de transmissão de curto alcance, devido à economia de energia, os sinais de comunicação entre os sensores e os *sinks* podem ser muito prejudicados em alguns casos. Assim, para melhorar a comunicação, é proposto neste trabalho dois *sinks* colocados em posições diferentes, como mostrado na Figura 13.

A estrutura de rede do programa de simulação desenvolvido é baseada no padrão IEEE 802.15.6 em capacidade e funcionalidade. A estrutura de rede do simulador opera na topologia estrela em conformidade com o protocolo de *polling*. A rede de *polling* tem um nó central que controla a transmissão e evita colisões dos pacotes como demonstrado em (Yuce et al. 2012).

No simulador desenvolvido existe a flexibilidade de adicionar novos parâmetros para obtenção dos resultados como é mostrado na Figura 35. Na tela do simulador é possível alterar os dados para a fonte geradora dos pacotes, os valores de entrada, o processamento e a exibição dos resultados. Na aba “Fonte/Entrada” os valores iniciais podem ser digitados. São eles: o número de pacotes, o tamanho médio do pacote em bits e quantos pacotes devem ser descartados antes do processamento. Nesta aba também é

possível selecionar o tipo de distribuição de geração de pacotes de origem ("exponencial negativa" ou "On / Off"), bem como as taxas de transmissão de primeiro e segundo nível.

Na aba "Processo" pode ser definido: o tamanho do buffer do sensor, qual técnica para o consumo dos pacotes será usada e definir os níveis de carga do sistema. Na aba denominada "Saída" é possível selecionar quais gráficos apresentar no final do processo da simulação.



**Figura 43. Visão geral da tela do simulador**

A Figura 43 mostra a tela principal do simulador, que possui opção e parâmetros de acordo com o modelo teórico proposto em cada simulação.

Como pode ser observado pela figura, existem 4 botões, que possuem as mesmas funções do menu "filas", e dão acesso às telas para os simuladores. Essas simulações estão divididas em M/M/1, M/M/1/n, M/D/1 e M/D/1/n e cada um possui uma tela em específico.

A Figura 43 mostra a tela para simulação com modelo M/M/1 em andamento. Como pode ser observado, o usuário pode alterar tanto o valor de  $\lambda t$  quanto a quantidade de pacotes que o simulador irá rodar para cada valor de  $\lambda t$  antes de iniciar a simulação. A simulação inicia quando o usuário clica no botão "0,1 Seg", e será obtido valores de capacidade de enlace para cada valor de  $\lambda t$ , valor este que se incrementa até 35 vezes o valor inicial definido pelo usuário na caixa de texto "Valor de  $\lambda t$ ". Na área de texto "Ensaio para descobrir a capacidade inicial" os valores das simulações iniciais são

apresentados. Esse detalhe é melhor explicado na seção 4.4.1, onde o algoritmo do simulador é detalhado. No lado direito superior de cada janela é exibido o gráfico para cada valor de tempo de espera no sistema. Abaixo existem duas tabelas, a da esquerda contendo os ensaios para achar os valores da capacidade para cada valor de  $\lambda t$  obtida a partir da capacidade da  $\lambda t$  anterior e a da direita contendo os valores exatos das capacidades que compõe os valores do gráfico.

Ao final da simulação para cada valor de  $E\{T_s\}$  o simulador espera outro clique em outro botão, de modo a facilitar a análise de dados até então obtidos para cada valor de  $E\{T_s\}$ . Assim, o usuário deve clicar no botão “0,2 Seg” e “0,3 Seg” para finalizar as simulações para o modelo.

A Figura 43 apresentam as telas do simulador para os modelos M/M/1/n M/D/1 e M/D/1/n

É possível notar na Figura 43 que para os casos em que existam buffers finitos, outro gráfico é apresentado logo a direita do gráfico de capacidades. Esse gráfico expõe as probabilidades de perda para cada valor de  $C$  em função de  $\lambda t$ . As telas mostradas na Figura 43 mostram também que as tabelas para esses modelos são mais detalhadas, apresentado o valor de  $\lambda$  efetiva, bem como os valores de pacotes que foram perdidos ou processador pelo sistema.

## Anexo I. - Publicações da dissertação

### 1. Artigo apresentado na conferência eTelemed 2015

#### 1.1 Comprovante de aceitação



Fernando Di Gianni <fernandodigianni@gmail.com>

eTELEMED 2015: Your contribution 40137 is accepted

IARIA Confirmation <confirmation@iariasubmit.org> 1 de dezembro de 2014 22:01 Responder a:  
petre@iaria.org  
Para: fernandodigianni@gmail.com Cc: confirmation.log@iariasubmit.org

Dear Fernando Di Gianni,

Congratulations! Your contribution 40137 to eTELEMED 2015 titled "Enhanced Performance Analysis of a Hierarchical *Polling*-based MAC Access Scheme for WBAN" is accepted as 1. regular paper [in the proceedings, digital library] / academic research.

There are some fixable issues that must be addressed before the article is ready for publication:

- Scientific and technical;
- English & punctuation, and
- Sections and presentation flow.

To proceed further, please register the paper and pay the registration. IARIA will allocate technical and linguistic resources to assist with the fixing process. The comments received from the reviewers will be the starting point for the interaction with the IARIA representative.

The final revision and fixing process will start immediately after the registration transaction is successfully processed.

Upon receipt of this notification, please proceed to complete your registration:

- go to the "Registration form" on the conference site: <http://www.iaria.org/conferences2015/RegistrationTELEMED15.html>
- fill it out with all required information including the payment information
- submit it

Once the registration is successfully processed, somebody from IARIA will contact you to finalize the camera-ready based on reviewers' comments.

----- Preparing the camera-ready process ----

1. Registration processed and IARIA will contact you about your article

2. Work on the first round of comments sent after registration (additional rounds will come). Please consider the enforced action for English/punctuation/figures; see: the editorial guide posted at <http://www.iaria.org/editorialrules.html>

3. Update validation and additional comments.

If you have any questions, contact directly [petre@iaria.org](mailto:petre@iaria.org) The timeline of this entire process would be:

1. Registration successfully completed by December 16, 2014

2. You acknowledge your availability to work with someone from IARIA to finalize the paper at latest on

December 10, 2015

Note that this work may extend beyond the posted camera ready deadline. Arrangements have been made with the publisher in order to accommodate this. Going beyond the official deadline does not jeopardize the publication of the article.

Note that sometimes there are several articles needing assistance, so a reply to your email may be delayed.  
On behalf of the organizing committee,  
Petre

O artigo tem o título "Enhanced Performance Analysis of a Hierarchical *Polling*-based MAC Access Scheme for WBAN" e está no formato full paper.

## Enhanced Performance Analysis of a Hierarchical Polling-based MAC Access Scheme for WBAN

Fernando Di Gianni and Shusaburo Motoyama

Master Program in Computer Science

Faculty of Campo Limpo Paulista - FACCAMP

Campo Limpo Paulista, Brasil

fernandodigianni@gmail.com; shumotoyama@gmail.com

**Abstract**—An enhanced performance analysis of a hierarchically structured access scheme for a Wireless Body Area Network (WBAN) is carried out in this paper. The access scheme uses the polling technique in each hierarchy level. Sensor nodes from first level are provided with infinite size buffers and both first and second levels use exhaustive polling technique. The study is done through computer simulation and mathematical models. Initially, the results of computer simulation are compared to the mathematical modeling. In spite of some approach used in mathematical modeling, the both results are very close. Next, to overcome the sensibility of second level to the input load of first level the performance analysis is carried out using different transmission rates for first and second levels.

**Keywords**—*hierarchical polling; computer simulation; wireless body sensor network.*

### I. INTRODUCTION

In Wireless Body Area Network (WBAN), sensors are placed in various parts of the body and measure vital signs, such as temperature, blood pressure, heartbeat, etc., and transmit these data to an external device. The sensors can be placed on the skin or be implanted under the skin, and communication with the external device is always wireless, which ensures greater mobility and comfort to patients with WBAN. When a sensor is equipped with processing and data transmission capabilities will be denoted sensor node and the external device as sink node in this paper.

In the deployment of sensors in the body, certain requirements must be considered, as the short distance transmission, low power consumption and very small dimension of a sensor. These features provide a low level of radiation, longevity in use the sensor without battery replacement and providing comfort for users [1].

When multiple sensor nodes begin to transmit packets simultaneously, collisions occur and packets must be retransmitted, wasting energy. Thus, the MAC must be designed to avoid collision and operate efficiently to reduce energy consumption. One of the MAC access schemes presented in the literature uses the polling technique for data collection of sensors [2]. In the presented work, the sensors are divided into groups and each group has a sink node that collects data from sensors using the polling technique. To collect the data from sink nodes, there is another node called master that collects the data, also using the polling technique.

This structure was denoted hierarchical MAC access based on polling technique [2] and the performance of this scheme has been studied theoretically using mathematical models.

In the theoretical models presented in [2], some approaches were used for the analysis of second level of hierarchy and the accuracy of models must be verified. The purpose of this article is twofold. Firstly, the analysis of the proposed structure in [2] is carried out through computer simulation to validate the theoretical model. Secondly, to overcome the sensibility of second level to the input load of first level is proposed different transmission rates for first and second levels and its performance analysis is carried out.

The paper is organized in six sections. In Section II related work is described. The concepts related to MAC access scheme based on hierarchical topology are presented in Section III. The developed computational simulator and the analysis of the results are discussed in Section IV. In Section V the performance analysis using different transmission rates for first and second levels is carried out. Finally, the main conclusions are presented in Section VI.

### II. RELATED WORK

To fulfill the MAC protocol requirements for WBAN such as low power consumption, quality of services and security many proposals have been presented in the literature. The main standard for WBAN the IEEE 802.15.6 proposes general guidelines and it is not concerned with a specific type of access. Thus, many MAC scheme proposals can be implemented. Some proposals are compatible with IEEE 802.15.4 as presented in [6] denoted BAN MAC protocol which is a low power, designed for star topology. Upon receiving the data from the sensors, this MAC protocol dynamically adjusts the protocol parameters to improve energy conservation in sensors with low energy level.

Many proposals are based on Time Division Multiple Access (TDMA) access technique [4][5][8][9]. Each of the proposals explores some special features based on medical needs. For instance, in [4] to deal with the light and heavy loads in normal and urgent situations, a context aware MAC is proposed. To guarantee Quality of Service (QoS) of a WBAN, a MAC protocol based on random access technique is proposed in [9]. In the proposal presented in [8], the heart beating is used for the purpose of clock synchronization. In [5], the beacon used for wake-up sensor nodes is used for battery charging, increasing the network life time.

Some proposals are based on polling access technique [2][7][10][11]. In [7] the MAC scheme based on flexible polling, guaranteeing QoS for WBAN is proposed. In the proposed MAC scheme the urgent traffic has high priority and is served before the normal traffic. The performance of MAC scheme based on polling in [10] is studied under different types of On-Off sources. The hierarchical polling based MAC scheme and its performance study are presented in [2][11]. The study is carried out using mathematical modeling and some approaches are used. Since the performance study of this paper is also to analyze the scheme by computer simulation and without approaches the hierarchical scheme will be detailed in next section.

### III. HIERARCHICAL POLLING

The concept of hierarchical topology for WBAN was first presented in [3]. The idea was to minimize the fading of signals due to constant movement of the patient using WBAN. The sensor nodes have short ranges, typically less than 1 meter, and the transmission power is very low so that the fading of signals can be constant. In the work presented in [3], the sensors were divided into groups and each group is attended by an intermediate node using technique based on TDMA. The intermediate nodes are served by other hub node that also uses the TDMA technique.

In the work presented in [2], it was also used the concept of hierarchical topology, however, the technique of data collection is based on polling. In this proposal, sensor nodes of the first level are also divided into groups and the sink nodes collect the data from each group using the polling technique and in the second level, the master node collects all the data from sink nodes using also the polling technique. The hierarchical polling concept applied in a human body is illustrated in Figure 1.

The sensors, such as electroencephalography (EEG), electrocardiography (ECG), temperature (TPR), etc., are placed on the upper part of the body and are polled by the sink 2 which is attached to the arm, as shown in Figure 1. The sensors like motion (MTN), electromyography (EMG), glucose (GLC), etc., placed on the lower part of the body are polled by the sink 1 attached in a belt. The master node that polls the sink nodes can be a cellular phone or a device placed near the body. This device has connection to the internet so that the sensor data can be processed in a hospital or showed to a physician for diagnosis.

The communication protocol used to exchange information between the sensors and the sink node in a group works briefly as follows, noting that all communication is done wirelessly. The sink node transmits a broadcast packet containing the number of sensor node (a number that uniquely identifies the sensor node), that is, an authorization for a sensor node to transmit the data. This authorization packet contains in its header enough bits for the synchronization in the sensor node. After recognition of its

number, if a sensor node has packets to transmit, begins the

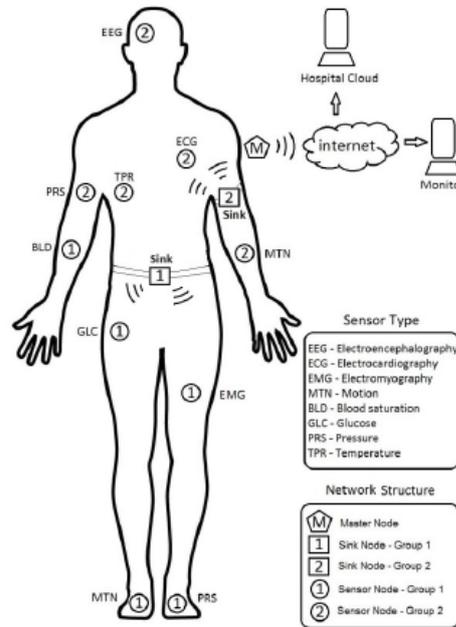


Figure 1. Hierarchical polling concept applied in a human body.

transmission. After transmission, the sensor node waits for confirmation packet in case of the need for retransmission. If the sensor node has no packets to transmit, the transceiver remains switched off to save power. The sink node recognizes that a sensor node is off waiting a small time interval after transmission of the authorization packet. If data do not arrive from the investigated sensor node, the sink node concludes that the sensor node has no data to transmit and begins to investigate the next sensor node in the sequence.

In this communication scheme, virtually all communication functions are in sink node and only the transmission function is assigned to the sensor node, in order to save its energy.

This same communication protocol described above can be used in the second level when the master node investigates sink nodes to obtain the data. Probably for a WBAN, only two levels are sufficient.

### IV. PERFORMANCE ANALYSIS

For the performance analysis the hierarchical polling scheme can be modeled as shown in Figure 2.

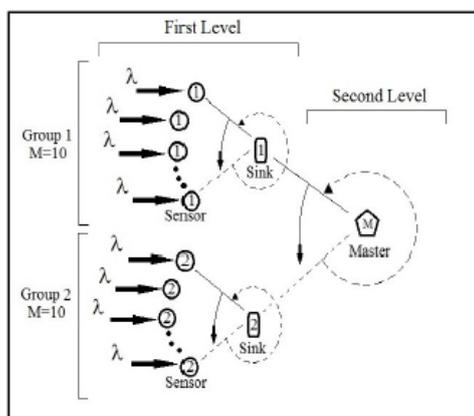


Figure 2. Hierarchical polling model for performance analysis.

As can be seen in Figure 2, the first level of the hierarchy is constituted of a number of sensors divided into groups, and each group is polled by a sink. The arrows represent the packets generated by each sensor with rate  $\lambda$  packets/s. In the second level the sink nodes are polled by the master node.

Based on the network model presented in Figure 2, a simulation program in Java language was developed for performance analysis of hierarchical polling scheme.

The input parameters of the simulation program are mean packet size of  $E\{X\} = 900$  bits, the link capacity of  $R_1 = 20$  kbps, packet transmission time of  $900 / 20k = 45$  ms (milliseconds), authorization packet transmission time of 4.5 ms and the packet synchronization time of 2 ms. These parameters are used to perform comparison with the theoretical model presented in [11].

A packet generated at each sensor follows a negative exponential distribution of mean  $1/\lambda$ . To ensure that the statistics are collected under a statistical equilibrium, the first 10,000 packets are discarded at each sensor node.

The input load,  $S_1$ , is defined as

$$S_1 = \frac{M\lambda E\{X\}}{R_1} \quad (1)$$

where  $M$  is the number of sensors,  $\lambda$  is the average packet arrival rate,  $E\{x\}$  is the average packet size and  $R_1$  is the channel capacity.

As a performance criterion, it is used the average transfer time of packets defined as the average waiting time of packets in the queue added to average packet transmission time in each sensor node. Another performance parameter is the average cycle time defined as the average time to inspect all sensor nodes in a cycle.

It was considered that the buffer for storing packets has infinite size, that is, lossless and the discipline of service is exhaustive, meaning that the buffer is completely emptied when it is inspected.

The central part of the algorithm used in the simulation is detailed in appendix A, after the references.

In a real case, the proposed body sensor network can monitor different biological signals such as temperature, pressure, among others, as shown in Figure 1. Since the sensors of a WBAN have short-range transmission capabilities due to energy saving, the communication signals among sensors and the sinks for some cases can be very impaired. Thus, two sinks placed in different positions to improve the communication capabilities are proposed in this paper, as shown in Figure 1.

The network structure of developed simulation program is based on the standard IEEE 802.15.6 in capability and function. The network structure of the simulator operates in a star topology and in accordance with the polling protocol. The polling network has a centralized node that controls the packet transmission and avoids collisions of packets as demonstrated in [14].

The developed simulator has the flexibility of adding new parameters to obtain the results, as is shown in appendix A, where a screen of simulator is presented.

Figure 3 shows simulation results and comparison with theoretical results in first level for mean transfer time. It can be observed that the results obtained in the simulation are close to the theoretical up to the load of 0.5. For load greater than 0.5, the simulation and theoretical curves are diverging, but considering that the load is high and the polling scheme is already operating in unstable condition, different results for simulation and theoretical are expected.

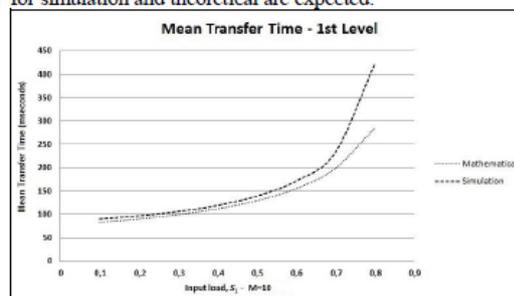


Figure 3. Packet mean transfer time of first level.

Figure 4 shows results for mean cycle time in first level. In this case, for the input load ranging from 0.1 to 0.6 the results obtained in the simulation are very close to the theory. For load greater than 0.6 the same phenomenon observed for mean transfer time occurs, that is, the curves are divergent.

For the analysis of second level it must be observed that in the exhaustive polling technique, the packets are stored in the buffer at each sensor node and wait its turn to be attended, and when a sensor node is polled, all packets are transmitted, so that the packets arrival to the sink node in burst.

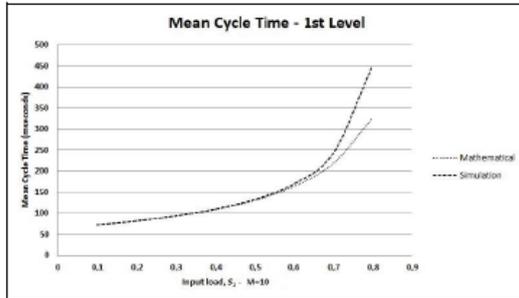


Figure 4. Mean cycle time of first level.

But, in the case of theoretical model, the negative exponential distribution of packet arrival at input of sink nodes is assumed [12]. In the case of simulation, the negative exponential distribution is assumed only at output of a sensor node. Figure 4 shows the comparison of results obtained by simulation and theoretical means for mean transfer time. It can be observed the both curves are very close, meaning that the approach used in theoretical model is very reasonable.

The curves of Figure 5 also show that the polling system, for given parameters, cannot operate with the load greater than 0.3 because the transfer times become prohibitively large, meaning that the waiting time of packets at each sensor node buffer is too large.

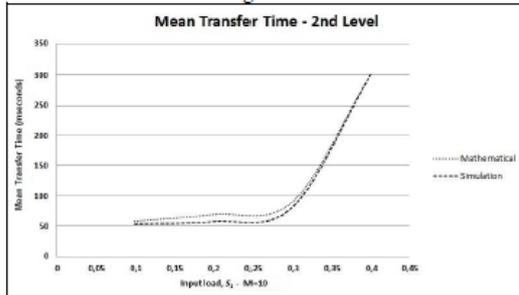


Figure 5. Packet mean transfer time of second level.

Figure 6 shows the behavior of the curves for mean cycle time. The curves show that for load up to 0.3 the mean cycle values are very close but some divergence for load above 0.3 can be observed but it is not significant.

It can also be observed that for load above 0.3, a small increment of input load, a large mean cycle time is obtained, approaching to the infinity quickly, showing the second level high sensitivity to the input load.

The general conclusion is that in order to have stable operation in the first and second levels of the hierarchical polling scheme with the given parameters, the system must operate with a load lower than 0.3.

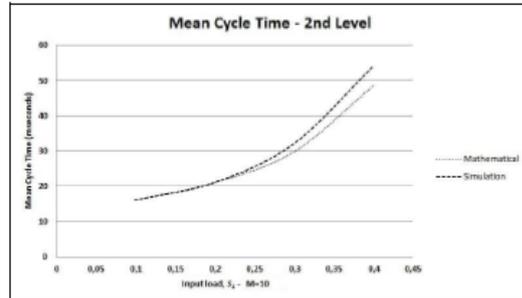


Figure 6. Mean cycle time of second level.

It can also be observed that for input load above 0.4, a small increment of the load, both transfer and cycle times have exponential values as can be seen in Figures 5 and 6, meaning a high sensitivity of the second level to the input load.

#### V. ENHANCED CAPACITY OF SECOND LEVEL

As seen in section four the second level has high sensitivity to the load of first level. To improve the performance of second level a higher link capacity can be used in this level. The use of low link capacity in first level is convenient because the sensors are implanted under skin or placed very close to the skin, so that low frequencies devices can avoid any damage to human body. The hierarchical structure studied in this paper can use different capacities for first and second levels to improve the performance of system.

To show the performance of second level using different capacities a theoretical analysis is carried out.

Since there is no loss in first level, the performance model for second level will be as shown in Figure 7 [11].

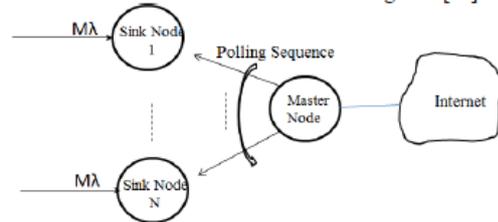


Figure 7. Second level performance model for infinite buffer case.

The mean cycle time for this case is given by

$$T_{c2} = \frac{Nw_x}{(1 - S_x)}, \quad (2)$$

where N is the number of sink nodes,  $w_x$  is the walk time (packet authorization transmission time plus synchronization time) and  $S_x$  is given by

$$S_x = \frac{NM\lambda E\{X\}}{R_x} = NS_1 \frac{R_1}{R_x} \quad (3)$$

where  $R_1$  is the transmission capacity of first level,  $R_x$  is the transmission capacity of second level and  $S_1$  is given by (1).

The stability condition is given by

$$S_x < 1 \Rightarrow NM\lambda E\{X\} < R_x \quad (4)$$

The queuing time in a buffer of second level is given by [11]

$$E\{W_2\} = \frac{Nw_x(1 - S_x/N)}{2(1 - S_x)} + \frac{S_x E\{X\}}{2R_x(1 - S_x)}, \quad (5)$$

for deterministic packet length.

The packet transfer time for the second level is given by

$$E\{T_2\} = \frac{E\{X\}}{R_x} + E\{W_2\}. \quad (6)$$

Assuming the capacity of 20 kb/s for first level and for the second level the following capacities will be assumed: 40 kb/s, 100 kb/s and 250 kb/s. In the literature the most frequent capacities cited are 19.2 Kbits/sec and 38.4 Kbits/sec used in Mica2Dot [12], and 250 Kbits/sec used in MicaZ [12][13]. These capacities are always used in first level in cited references. An advantage of the hierarchical structure is that the capacities of first and second levels can be uncoupled, so that a higher link capacity can be used in second level.

TABLE I. PARAMETERS FOR SECOND LEVEL.

Capacity $R_x$ Kbit/sec	Authorization Packet Time (ms)	Synchronization Time (ms)	Walk Time $w_x$ (ms)
20	4.5	2	6.5
40	2.25	1	3.25
100	0.9	0.4	1.3
250	0.36	0.16	0.52

Table 1 shows the parameters used for second level. The packet authorization time in the first line of Table 1 is calculated considering that packet has 10 % of length of data packet ( $E\{X\} = 900$  bits) and a transmission rate of 20 Kbit/sec, that is,  $90 / 20 K = 4.5$  ms. The synchronization time in first line of Table 1 is approached to 2 ms and the walk time is the addition of packet authorization time and synchronization time. The other values of packet authorization and synchronization times are calculated considering inversely proportional to the link capacities.

Using (5) and (6) and the parameters of Table 1, the mean transfer times for various link capacities of second level can be calculated as is shown in Figure 8. The figure shows that the performance limitation of second level using the same capacity of first level can be completely overcome using different capacities.

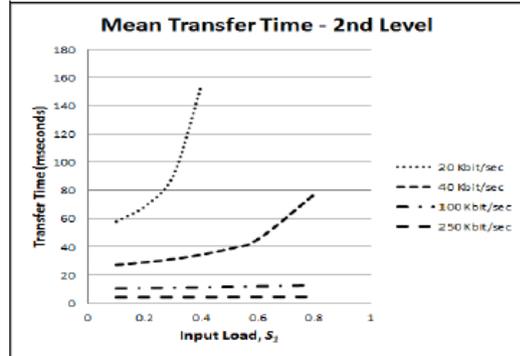


Figure 8. Performance comparison of transfer times for different transmission capacities of second level.

A Figure 8 shows using the double of first level capacity (40 Kbit/sec) the performance in relation to transfer times is much better. For the link capacity of 250 Kbit/sec the transfer time is very low and almost constant for any input load.

As shown in Figure 9 the curves of mean cycle times have the same behavior of mean transfer times. Using the double of link capacity of first level the cycle time of second level becomes stable, and for the capacity of 250 Kbit/sec the cycle time is almost constant for any input load.

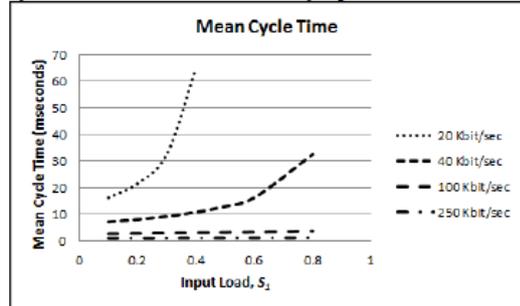


Figure 9. Performance comparison of cycle times for different transmission capacities of second level.

The results obtained in Figures 8 and 9 can be compared to the results presented in [2][11]. The performance study presented in [2][11] considered the same transmission rate of 20 Kbit/s in both first and second levels and as the result, the mean transfer and cycle times of second level were very sensitive to the input load. The second level could operate in stable condition if only less than 0.4 of input load was applied in first level. Figures 8 and 9 show that just doubling the transmission rate of second level, the input load can also be doubled to 0.8 for stable operation of second level. For higher transmission rates, the stable operation of second level is almost independent of load of first level.

## VI. CONCLUSION

A MAC scheme hierarchy structured using polling-based technique was analyzed in this paper. The results obtained for mean transfer times by simulation in first level of hierarchy were compared to the theoretical results, showing good closeness for light loads and some divergence for high loads. For high loads, the polling system is operating in unstable condition so that some divergence is expected. The same conclusion was observed for mean cycle time in the first level. The results for mean transfer times of second level of hierarchy, in spite of some approach assumed in theoretical model for this level, showed a good closeness for both simulation and theory for all range of load. Thus, concluding that theoretical model is a good model. The results for mean cycle times of second level showed that for load up to 0.3 are very close but some divergence for load above 0.3 can be observed but it is not significant. It was also observed that for load above 0.3, a small increment of input load, a large mean cycle time is obtained, showing the high sensitivity of second level to the input load.

To overcome the sensitivity of second level to the input load a study using different and higher transmission capacities in second level was carried out. The study showed that using the double capacity in second level the polling system becomes stable for almost all input load, and for the capacity of 250 Kbit/sec the transfer times, as well cycle times are almost constant for any input load.

In future work, other models of sensor nodes reflecting real situations will be incorporated to the simulation program to study real capability of hierarchical polling-based MAC scheme.

## REFERENCES

- [1] S. Ullah and K. S. Kwak, "Performance study of low-power MAC protocols for Wireless Body Area Networks," Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops), IEEE 21st International Symposium, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 112-116.
- [2] S. Motoyama, "Hierarchical Polling-based MAC scheme for Wireless Body Sensor Network," The 2013 International Conference on Wireless Networks - ICWN'13, Las Vegas, USA, 2013, pp. 103-109.
- [3] S. Marinkovic, C. Spagnol, and E. Popovici, "Energy-Efficient TDMA-Based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks," Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM '09, Athens, Greece, June 2009, pp. 604-609.
- [4] Z. Yan and B. Liu, "A context aware MAC protocol for medical Wireless Body Area Network Wireless," Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE Computer Society, 7th International Communications and Mobile Computing Conference - IWCMC 2011, vol. 2, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 2133-2138.
- [5] D. Layerle and A. Kwasinski, "A power efficient pulsed MAC protocol for body area networks," in IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2011, pp. 2244-2248.
- [6] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, and V. C. M. Leung, "Body Area Networks: A Survey", Mobile Network Application, Springer, 2011, pp. 171-193.
- [7] S. Motoyama, "Flexible Polling-based Scheduling with QoS Capability for Wireless Body Sensor Network," 37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks - LCN 2012, Clearwater, USA, 2012, pp. 749-756.
- [8] L. Huaming and T. Jindong, "Heartbeat-driven medium-access control for body sensor networks," IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 14, No. 1, Jan. 2010, pp. 44-51.
- [9] A. A. Khaled, H. S. Jahangir, and T. H. Moufah, "QoS-based MAC protocol for medical wireless body area sensor networks," in IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2010, pp. 216-221.
- [10] T. A. Pazeto, L. F. Refatti, and S. Motoyama, "Polling-based Medium Access Control Scheme for Wireless Body Sensor Network," in International Conference on Wireless Networks - ICWN-12, Las Vegas, 2012, pp. 87-93.
- [11] S. Motoyama, "Performance of Hierarchical Polling-based MAC scheme for Wireless Body Sensor Network," The 2014 International Conference on Wireless Networks - ICWN'14, Las Vegas, USA, 2014, pp. 23-28.
- [12] Crossbow. MicaZ Datasheet. Available in: [http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz\\_data\\_sheet.pdf](http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_data_sheet.pdf) - [retrieved: September, 2014].
- [13] M. L. Sichitiu, "Cross-Layer Scheduling for Power Efficiency in Wireless Sensor Networks," Proceedings of INFOCOM 2004, Hong Kong, 2004, pp. 1740-1750.
- [14] M. R. Yuce and J. Y. Khan, "Wireless Body Area Networks, Technology, Implementation, and Application," Pan Stanford Publishing, Boca Raton, 2011, pp. 270.

## APPENDIX A

Figure 10 shows the main parts of the developed algorithm for simulator. The first step of the algorithm is the generation of the arrival times of packets using the negative exponential distribution and store in a attribute of class named Packet. Each newly generated packet is placed in a FIFO (First In First Out) queue that represents a Sensor. Two other attributes of this class are the sink and master clock times which are obtained during the simulation. The following step is the verification of sensor queues of Group1 in a polling sequence so that the packets of each queue can be served exhaustively. Each attended

packet receives a clock stamp and is moved to the Sink1 queue. When all packets are served, the packets are in a FIFO sequence in the Sink1. Then the process goes to the next Group2 and same procedure of previous step is repeated so that the packets are stored in the queue of Sink2. The next step is the verification of sink queues of second level to serve the packets in the exhaustive polling sequence. Each attended packet receives a clock stamp and is sent to the Master queue. During the polling process the mean transfer and polling cycle times and other parameters are calculated.

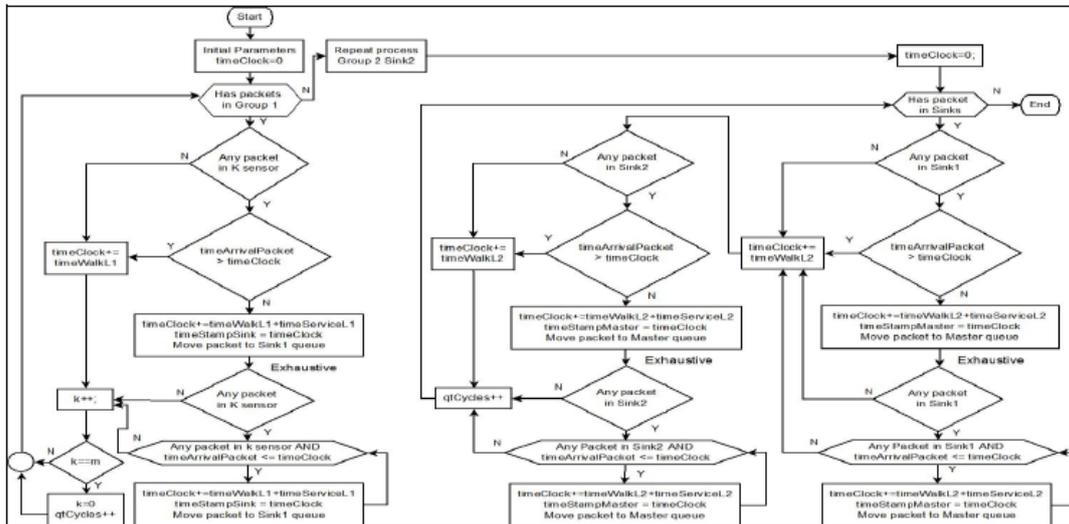


Figure 10. Overview of main algorithm developed for the performance analysis of hierarchical polling-based MAC scheme.

Figure 11 shows a screen of simulator where the changes of source/input values, process and output are possible. In the tab named "Source/Input" the initial values can be typed. They are: numbers of packets and sensors, the mean packet size in bits and the number of packets to be discarded before the statistics. In this tab, it is also possible to select the type of source packet generation distribution

("Negative Exponential" or "On/Off") as well as the transmission rates of first and second levels. In the tab named "Process" the sensor buffer size can be set, what technique for packet service will be used and the system load range. In the tab named "Output", it is possible to select the result graphs for presenting at the end of the simulation process.

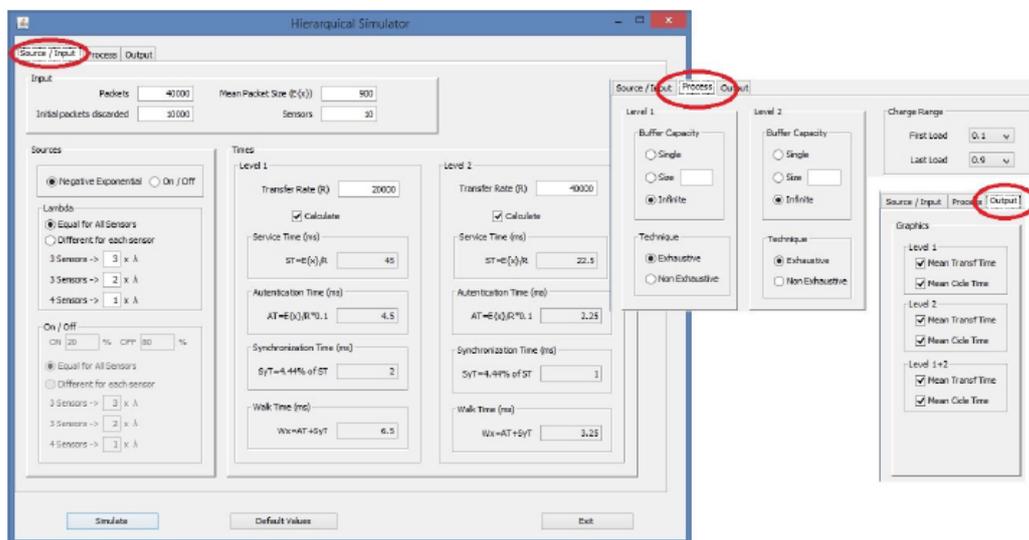


Figure 11. Overview of the simulator screen.

## 2. Artigo apresentado no X Workshop de Computação da FACCAMP

O Workshop de Computação da FACCAMP (WCF) é um evento de abrangência nacional promovido pela Faculdade Campo Limpo Paulista.

### 2.1. Comprovante de aceitação do artigo

O e-mail a seguir referente à aceitação do artigo "Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN" para o WCF.

Fernando Di Gianni <fernandodigianni@gmail.com>

Notificação do resultado da revisão do artigo 15 do X WCF 2014

X WCF 2014 <xwcf2014@easychair.org> 18 de agosto de 2014 13:56  
Para: Fernando Di Gianni <fernandodigianni@gmail.com>

Prezado Fernando Di Gianni:

Comunicamos que seu artigo "Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN" submetido ao X Workshop de Computação da FACCAMP foi **ACEITO**. Os comentários dos revisores estão incluídos no final deste e-mail. Lembramos que o prazo de submissão da versão final com as sugestões dos revisores é o dia 5 de setembro de 2014.

Atenciosamente,

Ana Maria Monteiro Comité de Programa.

----- REVIEW 1 ----- PAPER: 15  
TITLE: Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN  
AUTHORS: Fernando Di Gianni and Shusaburo Motoyama

OVERALL EVALUATION: 2 (accept) REVIEWER'S CONFIDENCE: 3 (medium)

----- REVIEW -----  
O trabalho refere-se à análise de desempenho de um esquema de acesso hierárquico baseado em *polling* para WBAN. O esquema é apresentado com clareza, a análise é feita baseada num simulador escrito em linguagem Java e o resultado obtido para o primeiro nível da hierarquia, onde ficou concentrado o trabalho, ficou próximo do teórico. Sugere-se que o esquema proposto seja comparado com outros esquemas, como aqueles que não usam o *polling*, para trabalhos futuros.

----- REVIEW 2 ----- PAPER: 15  
TITLE: Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN  
AUTHORS: Fernando Di Gianni and Shusaburo Motoyama

OVERALL EVALUATION: 3 (strong accept) REVIEWER'S CONFIDENCE: 4 (high)

----- REVIEW -----  
Resumo

Retirar a vírgula da primeira frase. Introdução  
Deixar em itálico Wireless Body Area Network.  
Ficou estranho “ sobre a pele ou serem implantados sob a pele”. A afirmação “é sempre sem fio” deveria ser referenciada.  
Deixar em itálico Media Access Control.  
Na frase “Nos modelos teóricos apresentados em [Motoyama 2013]....” a forma de referenciar é Motoyama (2013). O mesmo para a frase “A proposta deste artigo é analisar a estrutura proposta em [Motoyama 2013]....”.

Substituir Da por DE em “da simulação computacional”.

Substituir, em alguns momentos, a palavra “apresentados” no último parágrafo.

Seção 2.

Na frase “O conceito de topologia hierárquica para WBAN foi apresentado pela primeira vez em [Marinkovic and Spagnol and Popovici 2009]”, a forma de referenciar é Marinkovic, Spagnol and Popovici (2009).

Retirar a vírgula após a palavra “pois” no primeiro parágrafo. Deixar em itálico Time Division Multiple Access.

Na frase “No trabalho apresentado em [Motoyama 2013] foi utilizado...” referenciar como Motoyama (2013). A figura 1 deve estar em português.

Acentuar “hierárquico” na legenda da figura.

Na frase “O nó *sink* transmite por difusão um pacote que contém o número “de” nó sensor...” substituir DE por DO.

Na frase “Como critério de desempenho, utilizou-se o tempo médio de transferência de pacotes que é definida como o tempo médio de espera...” alterar definida por definido.

Na frase “Considerou-se que o buffer de espera dos pacotes tem tamanho infinito, isto é...” acrescentar vírgula após ISTO É.

“A Figura 2 mostra os resultados da simulação e a comparação com os resultados teóricos”, deve ser início de parágrafo.

Na frase “Pode-se observar que os resultados obtidos na simulação estão bem próximos dos teóricos.” Alterar dos teóricos para do teórico.

Segmentar a Figura 2 em (a) e (b). Ficou estranho tempo DE médio na Figura 2 (a). Sugiro tempo médio. Nesta figura, não deixe a representação dos resultados da simulação e do teórico usando traço. Use traço para um e estrela, por exemplo, para o outro. Assim ficará mais nítido.

No texto “(acima de 0.6)” alterar 0.6 para 0,6.

Conclusões

Substituir dos teóricos por do teórico na frase “da simulação do primeiro nível da hierarquia ficaram bem próximos dos teóricos....”.

Na frase “...comprovando dessa maneira que o modelo teórico adotado para esse nível é um bom modelo.” Esta mesma frase encontra-se no resumo. Tanto no resumo como nas conclusões deveriam ser reescritas, pois pelo entendimento o objetivo do artigo foi analisar o desempenho do esquema *polling* hierárquico para WBAN. Se este é de fato o intuito, deveria ter como principal conclusão que o modelo é viável para cargas inferiores a 0,6, sendo que o modelo foi validado com as técnicas de simulação e modelagem analítica.

Substituir “Para o trabalho futuro” por “Como trabalho futuro”.

Referências

Devem ser corrigidas para estarem no formato da SBC.

## 2.2. Artigo submetido

A seguir, o artigo submetido ao workshop é apresentado. O artigo tem o título "Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN". Esse artigo apresenta de forma extremamente sucinta a proposta de *Polling* Hierárquico apenas no primeiro nível, devido ao fato de ser um short paper.

# Análise de Desempenho de um Esquema de Acesso Hierárquico Baseado em *Polling* para WBAN

Fernando Di Gianni, Shusaburo Motoyama

Mestrado em Ciência da Computação – Faculdade Campo Limpo Paulista (FACCAMP)  
Rua Guatemala, 167 - Campo Limpo Paulista – SP – 13231-230 – Brasil

fernandodigianni@gmail.com, shumotoyama@gmail.com

**Abstract.** *The performance analysis of a hierarchy structured access scheme for wireless body sensor network – WBAN is carried out in this paper. The access scheme uses polling technique in each level of hierarchy. The study is made through computer simulation and the used performance parameters are the average packet transfer time and average polling cycle time. The results obtained through simulation for the first level of hierarchy almost matched with theoretical results, so proving that the adopted theoretical model is a good model.*

**Resumo.** *Neste artigo é feita a análise de desempenho de um esquema de acesso estruturado hierarquicamente para uma rede corporal de sensores sem fio – WBAN. O esquema de acesso utiliza a técnica polling em cada nível de hierarquia. O estudo é feito através de simulação computacional e utiliza como os parâmetros de desempenho o tempo médio de transferência de pacotes e o tempo médio de ciclo de polling. Os resultados obtidos através da simulação para o primeiro nível da hierarquia ficaram bem próximos dos teóricos, comprovando, dessa maneira, que o modelo teórico adotado para esse nível é um bom modelo.*

## • 1. Introdução

A rede de área corporal sem fio - WBAN - *Wireless Body Area Network* objetiva monitorar e controlar os sinais vitais de um corpo humano. Nessa rede, os sensores são colocados em várias partes do corpo e medem sinais vitais como temperatura, pressão arterial, batimento cardíaco, entre outros, e transmitem esses dados para um dispositivo externo. Os sensores podem ser colocados sobre a pele ou serem implantados abaixo da pele, e a comunicação com o dispositivo externo é sem fio, o que garante maior mobilidade e conforto ao usuário de uma WBAN. Quando um sensor é dotado de capacidade de processamento e transmissão de dados sem fio pode ser denominado de nó sensor e o dispositivo externo de nó *sink* ou sorvedouro.

Na implantação dos sensores no corpo, alguns requisitos devem ser considerados, como transmissão à curta distância, baixo consumo de energia e dimensões diminutas. Essas características proporcionam baixo índice de irradiação, longevidade no uso do sensor sem reposição de bateria e conforto em consonância com Ullah and Kwak (2010).

Quando vários nós sensores começam a transmitir os pacotes simultaneamente, colisões ocorrem e os pacotes devem ser retransmitidos, desperdiçando energia. Assim, o controle de acesso ao meio ou MAC - *Media Access Control* deve ser projetado de maneira a evitar colisão e operar eficientemente para reduzir o consumo de energia. Um dos esquemas de acesso MAC apresentados na literatura utiliza a técnica *polling* como

exposto em Motoyama (2013). No trabalho apresentado, os sensores são divididos em grupos e cada grupo possui um nó *sink* que coleta os dados dos sensores utilizando a técnica *polling*. Para coletar os dados dos nós *sinks*, existe outro nó denominado de *master* que coleta os dados utilizando, também, a técnica *polling*. Esta estrutura de acesso MAC foi denominada de *polling* hierárquico em Motoyama (2013) e o desempenho desse esquema foi estudado teoricamente através de modelos matemáticos.

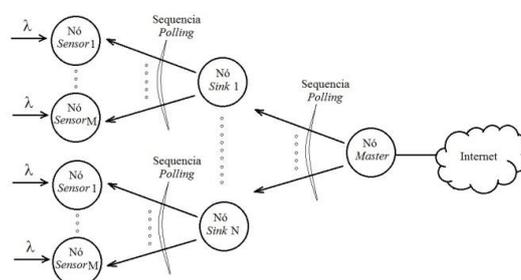
Nos modelos teóricos apresentados em Motoyama (2013) foram feitas aproximações e os resultados obtidos necessitam ser comprovados quanto as suas exatidões. A proposta deste artigo é analisar a estrutura proposta em Motoyama (2013) através de simulação computacional para validar o modelo teórico. Neste artigo, é analisado somente o primeiro nível da estrutura hierárquica.

O artigo está organizado em quatro seções. Na segunda seção são expostos os conceitos relacionados com os esquemas de acesso MAC baseados em topologia hierárquica. Alguns detalhes do simulador computacional desenvolvido e a análise dos resultados obtidos são apresentados na terceira seção. Finalmente, as principais conclusões são demonstradas na seção quatro.

## • 2. MACs com Topologia Hierárquica

O conceito de topologia hierárquica para WBAN foi apresentado pela primeira vez em Marinkovic and Spagnol and Popovici (2009). A ideia foi minimizar as áreas de sombras devido ao desvanecimento do sinal, pois os sensores na WBAN têm curtos alcances, geralmente menos de 1 metro e a potência de transmissão é bastante baixa e qualquer obstáculo ou movimento ocasionará o desvanecimento do sinal. No trabalho apresentado, os sensores foram divididos em grupos e cada grupo é atendido por um nó intermediário utilizando a técnica TDMA - *Time Division Multiple Access*. Os nós intermediários são atendidos por outro nó concentrador que utiliza, também, a técnica TDMA.

No trabalho apresentado em Motoyama (2013) foi utilizado, também, o conceito de topologia hierárquica, porém, a técnica de coleta de dados é baseada em *polling*. Nessa proposta os nós sensores do primeiro nível, são, também, divididos em grupos e os nós sorvedouros ou nós *sink* coletam os dados de cada grupo utilizando a técnica *polling* e o nó *master* ou o nó *master* coleta todos os dados dos nós *sink* do segundo nível, utilizando, também, a técnica *polling* como mostrado na Figura 1.



**Figura 1. Polling Hierárquico Motoyama (2013)**

O protocolo de comunicação utilizado para a troca de informações entre os nós sensores e o nó *sink* em um grupo funciona resumidamente da seguinte forma, lembrando que toda a comunicação é feita sem fio. O nó *sink* transmite por difusão um pacote que contém o número do nó sensor (número que identifica unicamente o nó sensor), isto é, é uma autorização para que um nó sensor transmita os dados. Este pacote de autorização

contém em seu cabeçalho bits suficientes para a sua sincronização no nó sensor. Após o reconhecimento do seu número, se um nó sensor tem pacotes para transmitir, começa a transmitir. Depois da transmissão, o nó sensor espera por pacote de confirmação para o caso da necessidade de retransmissão. Se o nó sensor não tem pacotes para transmitir, mantém o transceptor desligado, para economizar energia. O nó *sink* reconhece que um nó sensor está desligado esperando um intervalo pequeno de tempo após a transmissão do pacote de autorização. Se os dados não chegam daquele nó sensor investigado, o nó *sink* conclui que o nó sensor não possui dados para transmitir e começa a investigar o próximo nó sensor na sequência.

Neste esquema de comunicação, praticamente todas as funções de comunicação ficam no nó *sink* e somente a função de transmissão é atribuída para o nó sensor, com o objetivo de economizar a sua energia.

Este mesmo protocolo de comunicação descrito acima pode ser utilizado no segundo nível quando o nó *master* investiga os nós *sink* para obter os dados. Provavelmente, para uma WBAN apenas dois níveis serão suficientes.

### • 3. Simulador e Resultados

Foi desenvolvido um programa de simulação computacional na linguagem Java, para análise de desempenho do *polling* hierárquico. O programa desenvolvido contempla toda estrutura de rede, mas somente o primeiro nível será analisado neste artigo.

Os parâmetros de entrada de dados do programa simulador foram: tamanho médio do pacote de  $E\{X\} = 900$  bits, capacidade do canal de  $R = 20$  kbps, tempo de transmissão de pacote de  $900/20k = 45$ ms (milissegundos), tempo de transmissão do pacote de autorização de 4,5ms e o tempo de sincronização de um pacote de 2ms. Esses parâmetros foram utilizados para realizar a comparação com o teórico.

Os pacotes gerados em cada sensor obedecem a uma distribuição exponencial negativa de média  $1/\lambda$ . Para garantir que as estatísticas coletadas estão em regime de equilíbrio estatístico, os 10.000 primeiros pacotes gerados são descartados em cada nó sensor do total de 50.000 criados.

A carga de entrada é definida como

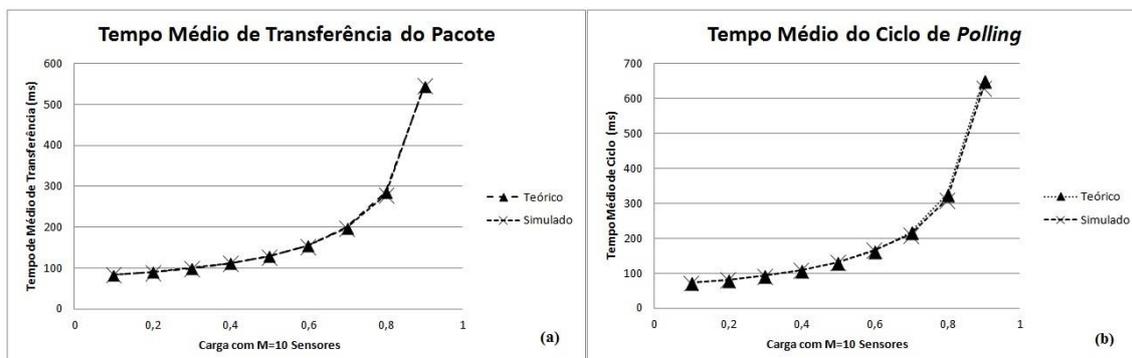
$$S = \frac{M\lambda E\{X\}}{R},$$

onde S é a carga de entrada, M a quantidade de sensores,  $\lambda$  a taxa média de chegadas de pacote,  $E\{X\}$  o tamanho médio do pacote e R a capacidade do canal.

Como critério de desempenho, utilizou-se o tempo médio de transferência de pacotes que é definido como o tempo médio de espera dos pacotes na fila de cada sensor somado com o tempo médio de transmissão de pacote. Outro parâmetro de desempenho é o tempo médio de ciclo que é definido como o tempo médio para inspecionar todos os sensores em um ciclo.

Considerou-se que o buffer de espera dos pacotes tem tamanho infinito, isto é, sem perdas e a disciplina de atendimento é exaustiva, significando que o buffer é completamente esvaziado quando é inspecionado.

A Figura 2 (a) e (b) mostra os resultados da simulação e a comparação com os resultados teóricos. Pode-se observar que os resultados obtidos na simulação estão bem próximos do teórico.



**Figura 2 (a) e (b). Comparações do Primeiro Nível - Tempo Médio de Transferência do Pacote e Tempo Médio do Ciclo de Polling**

Pelas curvas de tempos médios de transferência e de ciclo da Figura 2 (a), pode-se observar que não se pode operar com uma carga muito elevada (acima de 0,6), pois esses tempos se tornam proibitivamente grandes, significando que o tempo de espera de pacotes no buffer de cada nó sensor está muito grande, e que também na Figura 2 (b) o tempo de ciclo de atendimento encontrado é grande, e podem ocorrer situações em que algum nó sensor fique sem atendimento. Para que se tenha operação estável com os parâmetros dados, o esquema de *polling* hierárquico no primeiro nível deve operar com uma carga menor do que 0,6.

#### • 4. Conclusão

Foi desenvolvido um programa de simulação computacional para analisar e validar um esquema de acesso com topologia hierárquica baseada em *polling* para redes corporais de sensores sem fio – WBAN. Os resultados obtidos pela simulação, para cargas inferiores a 0,6 são próximos aos obtidos no modelo teórico.

Como trabalho futuro, o simulador será ampliado para analisar o segundo nível da hierarquia e comparar com o modelo teórico. Além da possibilidade de comparar com outros esquemas de acesso, o simulador poderá incorporar outros parâmetros como o nó sensor tendo buffer finito e também utilizar outros tipos de fontes de nós sensores que reflitam situações reais.

#### • Referências

- Marinkovic, S. and Spagnol C. and Popovici, E. (2009). “Energy-Efficient TDMA-Based MAC Protocol for Wireless Body Area Networks”. Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, Greece, p. 604-609.
- Motoyama, S. (2013). “Hierarchical Polling-based MAC scheme for Wireless Body Sensor Network”. International Conference on Wireless Networks - ICWN’13, Las Vegas, USA, p. 103-109.
- Ullah, S. and Kwak K. S. (2010). “Performance study of low-power MAC protocols for Wireless Body Area Networks”. IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops, Turkey, p. 112-116.