

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA VERGÜTZ

UM SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO ANTECIPADA E TRANSMISSÃO  
PRIORITÁRIA DE ALERTAS MÉDICOS SOBRE WBANS E WLANS

CURITIBA - PR

2017

ANDRESSA VERGÜTZ

UM SISTEMA DE IDENTIFICAÇÃO ANTECIPADA E TRANSMISSÃO  
PRIORITÁRIA DE ALERTAS MÉDICOS SOBRE WBANS E WLANS

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Informática no Programa de Pós-Graduação em Informática, setor de Ciências Exatas, da Universidade Federal do Paraná.

Área de concentração: *Ciência da Computação*

Orientadora: Profa. Dra. Michele Nogueira Lima

Coorientador: Prof. Dr. Alex Borges Vieira

CURITIBA - PR

2017

---

V498s

Vergütz, Andressa

Um sistema de identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos sobre WBANs e WLANs / Andressa Vergütz. – Curitiba, 2017.

64 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Informática, 2017.

Orientadora: Michele Nogueira Lima.

Coorientador: Alex Borges Vieira

1. Ciência da computação. 2. WBAN. 3. WLAN. I. Universidade Federal do Paraná. II. Lima, Michele Nogueira. III. Vieira, Alex Borges. IV. Título.

CDD: 004.62

---



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em INFORMÁTICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANDRESSA VERGÜTZ** intitulada: **Um Sistema de Identificação Antecipada e Transmissão Prioritária de Alertas Médicos sobre WBANs e WLANs**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 23 de Março de 2017.

  
MICHELE NOGUEIRA LIMA

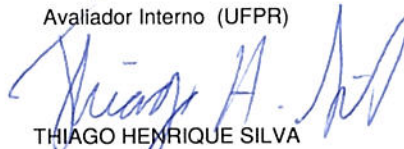
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
ALEX BORGES VIEIRA

Co-orientador - Avaliador Externo (UFJF)

  
LUIZ EDUARDO SOARES DE OLIVEIRA

Avaliador Interno (UFPR)

  
THIAGO HENRIQUE SILVA

Avaliador Externo (UTFPR)



*A minha amada família, ao grupo de  
pesquisa NR2 e a toda comunidade  
acadêmica.*

# Agradecimentos

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus por toda força e luz transmitida nessa etapa de minha vida. Em seguida, agradeço em especial a minha família, meus pais Pedro e Jussara, aos meus irmãos Alan e Adinan, e a minha Nona Gema. Obrigada por sempre me apoiarem incondicionalmente, por apostarem em mim mais do que ninguém. Vocês são o meu porto seguro, o meu maior orgulho. Obrigada por todo apoio, eu amo vocês. Agradeço também ao Jardel por todo suporte, paciência e conselhos nos momentos difíceis. Você mesmo de longe, não deixou de me apoiar. Obrigada por todo amor e carinho dedicados a mim.

Agradeço a minha professora, orientadora e mentora Michele Nogueira Lima por me guiar nesse caminho do mestrado. Muito obrigada pelos ensinamentos, confiança, paciência e dedicação depositadas em mim. Foi um enorme orgulho ter sido orientada por você. Agradeço também ao meu coorientador Alex Borges Vieira da UFJF por todos os esforços, ensinamentos e orientações. Também agradeço ao professor Aldri Luiz dos Santos do NR2 pelas contribuições no meu crescimento profissional. Deixo também um obrigado ao professor Fernando Lucambio Pérez do Departamento de Estatística da UFPR e a aluna Vanessa Sehaber pela ajuda, disponibilidade, explicações e ensinamentos estatísticos. Muito obrigada de coração.

Agradeço de coração todos os colegas do laboratório NR2. Agradeço o Rafael, Ricardo, Mateus, Danilo (Mato Grosso), Danilo (Piauí), Benevid, Adi, Otto, Jeferson, Alisson, Arthur, Paulo e Gustavo. Agradeço também ao colega Bruno da UFJF por toda a ajuda e ideias trocadas. Agradeço os colegas dos outros laboratórios pela ajuda e parceria nas disciplinas. Vocês todos foram muito importantes nessa etapa de minha vida, vou levar a amizade sempre comigo.

Agradeço também as minhas irmãs de coração do "Lar Doce Lar 220". Deixo um muito obrigado a Vanessa (minha "cônjuge"), Zulma (mamacita), Sayuri (pelas corridas e longas conversas), Luanna (boleira), Estela (ou Estelão), as colombianas Estefania, Lina e Maria José, a Carlinha gaúcha, a Cláudia, Carla, Andressa (catarina), Karina e a Lili. Se esqueci de alguma menina, me desculpe, mas nenhuma foi menos importante. Vocês fizeram com que a "fase de mestrado" se tornasse mais leve. Deixo também um muito obrigado de coração a Dona Judi, o Romeu e a toda sua família que me acolheu como uma filha. Obrigada pelo carinho e hospitalidade. Vocês foram essenciais nessa caminhada. Eu sinto enorme gratidão por todos que fizeram parte da minha vida durante os anos deste trabalho e me ajudaram a amadurecer. Muito obrigada de coração a todos vocês!

# Resumo

Os aplicativos e dispositivos móveis têm sido cada vez mais utilizados no monitoramento dos cuidados com a saúde, como no acompanhamento de atividades físicas. Em 2016, cerca de 7 milhões de pessoas foram monitoradas remotamente por meio de dispositivos e aplicações médicas. Isso é possível, com o auxílio das redes e tecnologias sem fio, as quais oferecem mobilidade aos usuários. Precisamente, graças às redes corporais sem fio (WBANs) que possibilitam monitorar continuamente a saúde dos pacientes, e com isso, identificar as doenças em seus estágios iniciais. A Organização Mundial de Saúde aponta que quanto antes detectado os eventos críticos, como ataques cardíacos e paradas respiratórias, e transmitidos os alertas médicos sobre esses eventos para os centros hospitalares, maiores são as chances de prevenir os pacientes de futuras implicações. Porém, as redes sem fio apresentam limitações na comunicação, sendo vulneráveis a interferências e perdas. Sendo que perda de dados vitais pode acarretar em sérias consequências na vida dos pacientes. As soluções existentes para mitigar essas limitações em redes WBANs e redes locais sem fio (WLANs) ora se preocupam com a detecção de eventos críticos, ora com a transmissão prioritária de alertas médicos, sendo inexistentes soluções abordando os dois aspectos juntos. Além do mais, os métodos da literatura detectam os eventos críticos na saúde quando estes já estão em progresso e delimitam-se a limiares particulares dos sinais vitais. Apesar das WBANs oferecerem tratamentos prioritários para a transmissão dos alertas médicos, ainda se encontram lacunas no seu envio até o destino final. Desta forma, a identificação antecipada de eventos críticos na saúde dos pacientes atinge seu ápice quando associada à entrega imediata dos alertas aos profissionais da saúde. Visto que não adianta identificar um evento crítico se não for capaz de alertar os médicos a tempo de tomar ações de precaução. Diante disso, este trabalho apresenta SANTE (do inglês, System for Anticipated identification and Transmission of mEdical alerts on WBAN/WLAN), o primeiro sistema de identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos no contexto híbrido WBAN/WLAN. Particularmente, SANTE prediz tendências sobre a iminência de eventos críticos no comportamento dos sinais vitais por meio de um conjunto de indicadores estatísticos genéricos. Uma vez identificadas essas tendências, SANTE gera alertas médicos que recebem o maior nível de prioridade para transmissão e oferece prioridade de acesso ao meio através da redução da janela de contenção e intervalo AIFS na WLAN. A avaliação de desempenho do sistema SANTE, por meio de análises estatísticas e experimentos de simulação em ambientes de redes, mostra que os indicadores genéricos podem indicar a iminência de eventos críticos em sinais vitais reais. Também, os resultados apontam que SANTE, mesmo em um cenário denso, apresenta uma redução média de 39% na latência de transmissão dos alertas sem prejudicar os outros tipos de tráfego presentes no meio sem fio, como voz e vídeo.

**Palavras-chave:** WBAN, WLAN, Predição de Eventos, Transmissão Prioritária.

# Abstract

Applications and mobile devices have been increasingly used to monitor health care, such as physical activity monitoring. In 2016, about 7 millions of people were monitored remotely by medical devices and applications. This is possible with the aid of the wireless networks and technologies, which provide mobility to the user. Precisely, thanks to wireless body area networks (WBANs), which allow monitoring continuously the patients' health and with this, identify diseases in their early stages. World Health Organization points out that the sooner detected critical events, such as heart attacks and respiratory arrest, and transmitted the medical alerts about these events to the hospital, greater are the chances of preventing patients from future implications. Nevertheless, wireless networks suffer from communication constraints, being vulnerable to interferences and losses. Once loss of vital data can result in serious consequences in patients' life. The existing solutions to mitigate these limitations in WBANs and WLANs are either concerned with the detection of critical events or with the priority on medical alerts transmission, being inexistent solutions addressing jointly both aspects. Moreover, literature methods detect the critical events when they are already in progress and are limited to particular thresholds of vital signs. Although WBANs offer priority treatments for the medical alerts transmission, there are still gaps in their delivery to the final destination. In this way, the anticipated identification of critical events in patients' health reaches its paramount importance when associated to the urgent delivery of the alerts to healthcare professionals. Since, there is no use identifying a critical event if you are not able to alert doctors in time to take precaution measures. Therefore, this work presents SANTE, the first **S**ystem for **A**nticipated identification and **T**ransmission of **m**Edical alerts on WBAN/WLAN. Particularly, the system foresees trends about the imminence of critical events on patients' vital signs through a set of generic statistical indicators. When these trends are identified, SANTE generates medical alerts. It assigns the highest level of priority to these alerts and offers priority on medium access by reducing contention window and AIFS range on the WLAN. The performance evaluation of SANTE, through of statistical analysis and simulation experiments in networks environments, shows that generic indicators can indicate the imminence of critical events in real vital signs. Also, the results shows that SANTE, even in a dense scenario, present an average reduction of 39% in the medical alerts transmission latency without affect the other types of traffic present in the wireless environment, such as voice and video.

**Keywords:** WBAN, WLAN, Event Prediction, Priority Transmission.



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	2
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Contribuições . . . . .	4
1.4	Estrutura do Texto . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Fundamentos</b>	<b>5</b>
2.1	Redes Corporais sem Fio . . . . .	5
2.1.1	Arquitetura e Topologia das WBANs . . . . .	6
2.1.2	O Padrão IEEE 802.15.6 . . . . .	7
2.1.3	Priorização dos Alertas Médicos nas WBANs . . . . .	8
2.2	Redes Locais sem Fio . . . . .	9
2.2.1	O Padrão IEEE 802.11 . . . . .	10
2.3	Diferenças entre WBAN e WLAN . . . . .	12
2.4	Predição de Eventos Críticos em Doenças Humanas . . . . .	13
2.4.1	Conjunto de Indicadores Genéricos . . . . .	14
2.5	Resumo . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>20</b>
3.1	Identificação e Transmissão de Alertas Médicos . . . . .	20
3.2	Indicadores Genéricos na Previsão de Eventos Críticos . . . . .	22
3.3	Resumo . . . . .	23
<b>4</b>	<b>SANTE - Sistema Proposto</b>	<b>25</b>
4.1	Visão Geral . . . . .	25
4.2	Modelo da Rede . . . . .	26
4.3	O Sistema SANTE . . . . .	26
4.3.1	Coleta dos Dados . . . . .	27
4.3.2	Predição de Eventos Críticos . . . . .	28
4.3.3	Transmissão Prioritária dos Alertas Médicos . . . . .	30
4.3.4	Envio ao Destino Final . . . . .	31
4.4	Funcionamento Geral do SANTE . . . . .	32
4.5	Resumo . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Avaliação do Sistema SANTE</b>	<b>33</b>
5.1	Metodologia . . . . .	33
5.1.1	Ambiente de Avaliação . . . . .	33
5.1.2	Traços Reais sobre Sinais Vitais . . . . .	35
5.1.3	Cenários e Parâmetros . . . . .	36

5.1.4	Métricas . . . . .	38
5.2	Resultados . . . . .	39
5.2.1	Resultados dos Indicadores Genéricos . . . . .	39
5.2.2	Resultados das Simulações . . . . .	41
5.3	Resumo . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>44</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	44
6.2	Publicações . . . . .	45
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>46</b>

# Lista de Figuras

2.1	Arquitetura WBAN . . . . .	7
2.2	Arquitetura WLAN [Kurose e Ross, 2013] . . . . .	11
2.3	Rede <i>ad hoc</i> 802.11 [Kurose e Ross, 2013] . . . . .	11
2.4	Perda da resiliência no estado da saúde após perturbações (os círculos representam o estado da saúde e sua movimentação) [Rikkert et al., 2016]. . . . .	14
2.5	Indicador estatístico: autocorrelação. Os gráficos <b>A</b> e <b>B</b> ilustram exemplos de uma autocorrelação fraca e forte, respectivamente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico <b>C</b> apresenta o comportamento esperado da curva do indicador de autocorrelação para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012]. . . . .	16
2.6	Indicador estatístico: taxa de retorno. Os gráficos <b>A</b> e <b>B</b> apresentam taxas de retorno baixa e alta, respectivamente, após perturbações no estado de saúde do paciente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico <b>C</b> apresenta o comportamento esperado da curva da taxa de retorno para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012].	16
2.7	Indicador estatístico: variância. Os gráficos <b>A</b> e <b>B</b> demonstram exemplos de dados com baixa e alta variância, respectivamente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico <b>C</b> apresenta um aumento da variância, sendo esse o comportamento esperado para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012]. . . . .	17
2.8	Tipos de assimetria: curva simétrica (gráfico <b>B</b> ), que representa a distribuição normal; curva assimétrica negativa (gráfico <b>A</b> ); e curva assimétrica positiva (gráfico <b>C</b> ) [Mattos et al., 2017]. . . . .	18
2.9	Comportamento esperado da curva da assimetria para indicação da iminência de evento crítico: queda ou aumento da assimetria (gráficos <b>A</b> e <b>B</b> , respectivamente) [Dakos et al., 2012]. . . . .	18
2.10	Indicador estatístico: curtose. Os gráficos <b>A</b> e <b>B</b> demonstram exemplos de curtose mesocúrtica e leptocúrtica, respectivamente [Mattos et al., 2017]. O gráfico <b>C</b> apresenta o comportamento esperado da curva da curtose para a predição de evento crítico. . . . .	19
4.1	Arquitetura geral do SANTE . . . . .	27
4.2	Funcionamento da etapa <i>predição de eventos críticos</i> do SANTE . . . . .	29
4.3	As transmissões iniciam dentro da janela de contenção (CW) . . . . .	31
5.1	Metodologia de implementação do SANTE . . . . .	34
5.2	Traços reais de frequência respiratória . . . . .	36
5.3	Série temporal com janela de 840 segundos (ou 14 minutos) que precede o evento crítico de insuficiência respiratória. Por isso, a série temporal inicia no tempo 800 segundos e termina no tempo 1640 segundos (momentos iniciais do evento).	36
5.4	Cenário de avaliação . . . . .	37
5.5	Indicadores genéricos durante e após transição crítica . . . . .	40

5.6	Atraso médio <i>versus</i> densidade da rede . . . . .	42
5.7	Taxa de perda <i>versus</i> densidade da rede . . . . .	43

# Lista de Tabelas

2.1	Mapeamento prioritário da WBAN [Association et al., 2012] . . . . .	9
2.2	Parâmetros do EDCA . . . . .	12
3.1	Propriedades dos trabalhos da literatura . . . . .	22
5.1	Parâmetros utilizados nas simulações . . . . .	38

# Lista de Acrônimos

<b>AC</b>	<i>Access Category</i> Categoria de Acesso
<b>ACK</b>	<i>Acknowledgement Frame</i> Quadro de Confirmação
<b>AIFS</b>	<i>Arbitration Inter-Frame Spacing</i> Espaço Arbitrário entre Quadros
<b>AP</b>	<i>Access Point</i> Ponto de Acesso
<b>AR</b>	<i>Autoregressive Model</i> Modelo Autorregressivo
<b>BCU</b>	<i>Body Control Unit</i> Unidade de Controle do Corpo
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i> Conjunto de Serviço Básico
<b>CSD</b>	<i>Critical Slowing Down</i> Desaceleração Crítica
<b>CSMA/CA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> Acesso Múltiplo com Verificação de Portadora e Prevenção de Colisão
<b>CTS</b>	<i>Clear to Send</i> Autorização de Envio
<b>CW</b>	<i>Contention Window</i> Janela de Contenção
<b>DCF</b>	<i>Distributed Coordination Function</i> Função de Coordenação Distribuída
<b>DiffService</b>	<i>Differentiated Services</i> Serviços Diferenciados
<b>ECG</b>	<i>Electrocardiogram</i> Eletrocardiograma
<b>EDCA</b>	<i>Enhanced Distributed Channel Access</i> Acesso Aprimorado de Coordenação Distribuída
<b>EEG</b>	<i>Electroencephalogram</i> Eletroencefalograma

<b>EMG</b>	<i>Electromyography</i> Eletromiografia
<b>HCF</b>	<i>Hybrid Coordination Function</i> Função de Coordenação Híbrida
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i> Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<b>IFS</b>	<i>Inter Frame Spacing</i> Espaço entre Quadros
<b>LLQ</b>	<i>Low Latency Queuing</i> Enfileiramento de Baixa Latência
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i> Controle de Acesso ao Meio
<b>MIMIC</b>	<i>Multiparameter Intelligent Monitoring in Intensive Care Database</i> Monitoramento Inteligente Multiparâmetro em Base de Dados de Cuidados Intensivos
<b>PDA</b>	<i>Personal Digital Assistant</i> Assistente Digital Pessoal
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> Qualidade de Serviço
<b>RTS</b>	<i>Request to Send</i> Requisição de Envio
<b>TG6</b>	<i>Task Group 6</i> Grupo de Tarefa 6
<b>UDP</b>	<i>User Datagram Protocol</i> Protocolo de Datagrama do Usuário
<b>UTI</b>	Unidade de Terapia Intensiva
<b>WBAN</b>	<i>Wireless Body Area Network</i> Redes Corporais sem Fio
<b>WHO</b>	<i>World Health Organization</i> Organização Mundial de Saúde
<b>Wi-Fi</b>	<i>Wireless Fidelity</i> Fidelidade sem Fio
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i> Redes Locais sem Fio
<b>WPAN</b>	<i>Wireless Personal Area Network</i> Redes Pessoais sem Fio
<b>WSN</b>	<i>Wireless Sensor Network</i> Redes de Sensores sem Fio

# Lista de Símbolos

$\mu$	média de todos os valores
$n$	número de valores do conjunto de dados
$z$	cada valor do conjunto de dados
$\rho_1$	autocorrelação
$\sigma$	variância
$SD$	desvio padrão
$1\gamma$	assimetria
$\kappa$	curtose
$t$	tempo



# Capítulo 1

## Introdução

O envelhecimento da população em muitos países desenvolvidos e os crescentes custos dos cuidados com a saúde têm desencadeado o uso de novas tecnologias, impulsionando melhorias às atuais práticas dos centros de saúde [Latré et al., 2011]. Em vista disto, os recentes avanços nas tecnologias de comunicação sem fio e nos nanossistemas têm contribuído com o desenvolvimento de sensores inteligentes implantáveis ou vestíveis no corpo humano. A união desses sensores e das redes de comunicação sem fio, conhecida por Redes Corporais sem Fio (WBANs, do inglês, *Wireless Body Area Networks*), permite a coleta, o monitoramento e o envio dos sinais vitais para as aplicações médicas e profissionais da saúde, sem interferir na rotina diária dos pacientes [Movassaghi et al., 2014]. Um benefício desse acompanhamento contínuo é a possível identificação de riscos e problemas de saúde em estágios iniciais, promovendo cada vez mais o uso das aplicações médicas [Cavallari et al., 2014].

Estima-se que em 2016 cerca de 7 milhões de pessoas foram monitoradas remotamente por meio de dispositivos e/ou aplicações médicas [Mack, 2017]. Isso se deve, pelo fato das WBANs, em conjunto com as aplicações médicas, oferecerem um monitoramento contínuo, flexível e ubíquo. Em virtude disso, ambas têm recebido grande atenção das empresas e pesquisadores nos últimos anos [Cavallari et al., 2014]. Diversos projetos têm sido desenvolvidos neste âmbito como o *Jordan Healthcare Initiative* da Cisco, o *ResearchKit* da Apple e o *CodeBlue* da Universidade de Harvard. Todos esses projetos têm o objetivo de melhorar os cuidados com a saúde e a qualidade de vida dos pacientes. Note que, além de uma WBAN ser aplicada no contexto médico, ela é facilmente adaptada em outros setores como entretenimento, militar e esporte [Crosby et al., 2012]. Isso é possível, devido aos diferentes tipos de dados coletados pelos sensores das WBANs, como sinais vitais, movimentos do corpo e características do ambiente em que o paciente se encontra [Movassaghi et al., 2014].

As WBANs, por meio de seus sensores, emitem alertas médicos sobre situações emergenciais que venham ameaçar a vida dos pacientes, tais como ataques cardíacos e paradas respiratórias (i.e., eventos críticos) [Cavallari et al., 2014]. Esses eventos se caracterizam por um conjunto de observações, como sinais vitais de batimentos cardíacos, que alcançaram valores considerados críticos para a saúde do paciente. No entanto, a identificação de tais eventos críticos para a emissão de alertas sobre eles, atualmente, ocorre apenas quando esses eventos já estão em progresso. No geral, essa identificação é feita por meio de limiares particulares dos sinais vitais. Por exemplo, um evento crítico cardíaco só é determinado quando os batimentos superam uma determinada frequência. Apesar da identificação nos estágios iniciais das doenças possibilitar um tratamento mais adequado, quanto antes esses eventos forem detectados maiores são as chances de prevenir exacerbações nas doenças [Health Organization, 2015].

Além disso, a WBAN possui desafios ligados à latência e à perda de pacotes na transmissão dos alertas médicos [Al Masud, 2013]. Visto que atrasos ou perda de dados emergenciais podem provocar sérias consequências no diagnóstico médico, e, assim, na vida dos pacientes. Uma contramedida utilizada para solucionar esses problemas é a priorização dos alertas sobre os diferentes tipos de dados presentes nas WBANs [Cavallari et al., 2014]. No entanto, além das WBANs, diversas redes e tecnologias são utilizadas desde a coleta dos dados pelos sensores até a sua entrega no destino final. Além disso, a infraestrutura de um ambiente médico pode carregar diversos fluxos de dados, como voz e vídeo. A competição pelo meio de transmissão causa atrasos aos alertas médicos [Movassaghi et al., 2014]. Por isso, avanços ainda precisam ser feitos para a completa integração das aplicações médicas com as redes sem fio, haja visto que essas aplicações carregam dados de extrema importância.

## 1.1 Motivação

Um estudo feito pela Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization - WHO*) aponta que as quatro principais causas de morte no mundo são devido a doenças cardiovasculares, câncer, diabetes e doenças crônicas respiratórias [Health Organization, 2013]. Visto que, atualmente milhões de pessoas morrem, por ano, em consequência dessas doenças [Health Organization, 2015]. Além disso, estima-se que 17,5 milhões de pessoas morreram de doenças cardiovasculares em 2012, representando 30% de todas as mortes globais. O problema comum no tratamento médico dessas doenças resume-se no aparecimento dos sintomas no paciente quando as mesmas já se encontram em estágios avançados no corpo humano. Por consequência, efetua-se o diagnóstico médico quando a doença já está avançada, sendo muito tarde para tratá-la devidamente a tempo de salvar vidas [Movassaghi et al., 2014].

As pesquisas médicas têm mostrado que muitas doenças podem ser prevenidas se detectadas e tratadas em seus estágios iniciais [Health Organization, 2015]. Por exemplo, as doenças cardiovasculares quando medicadas e tratadas em seu início reduzem drasticamente o número de mortes. As WBANs possibilitam a identificação das doenças nos estágios iniciais [Movassaghi et al., 2014], porém quanto antes detectados os eventos críticos, como ataques cardíacos e paradas respiratórias, e transmitidos os alertas médicos sobre esses eventos para os centros hospitalares, maiores são as chances de prevenir os pacientes de futuras implicações [Health Organization, 2015]. Esses eventos se referem a situações que causam consequências graves no estado de saúde dos pacientes e, no geral, acontecem de forma espontânea sem apresentar sintomas prévios. Por este motivo, tornam sua identificação antecipada uma tarefa desafiadora, normalmente sendo identificados quando os eventos já estão em progresso.

A identificação antecipada de eventos críticos atinge seu ápice quando associada à entrega imediata dos alertas médicos aos profissionais de saúde [Cavallari et al., 2014]. Por sua natureza emergencial, os alertas médicos requerem sua transmissão imediata, aceitando no máximo 125 ms de latência [Movassaghi et al., 2014]. Atraso considerado adequado para tomada de ações dos médicos a tempo de salvar vidas segundo normas da WBAN [Association et al., 2012]. Esse nível de latência força que melhorias sejam feitas nas redes sem fio, uma vez que, desde a aquisição dos dados pelos sensores até a sua entrega no destino final, diversas redes e tecnologias são utilizadas. Além disso, as redes sem fio, como WBANs e WLANs, apresentam limitações na comunicação, sendo vulneráveis a interferências e perdas. Sendo que, perdas ou atrasos dos alertas médicos podem acarretar em consequências graves na saúde dos pacientes [Latré et al., 2011].

Além disso, apesar de se esperar que as WBANs sejam dedicadas às aplicações médicas, a infraestrutura de um ambiente médico pode carregar diversos fluxos de dados, como voz e vídeo, que em geral tem uma maior prioridade de acesso ao meio e transmissão. Desta forma, a

competição pelo meio de transmissão causa atrasos aos alertas médicos [Movassaghi et al., 2014], com possíveis consequências desastrosas à saúde do paciente. Esses diversos fluxos de dados são gerados pelos dispositivos móveis dos pacientes, visitantes e profissionais de saúde presentes nos hospitais. Como os centros de saúde possuem grande quantidade de pessoas, o número de dispositivos móveis conectados tende a ser grande também, aumentando assim a competição pelo meio sem fio. Com base em todos esses desafios, nota-se que além de identificar o quanto antes os eventos críticos na saúde dos pacientes, se faz necessária a transmissão imediata dos alertas médicos sem perdas e atrasos. Só assim, os profissionais da saúde poderão tomar ações a tempo de salvar vidas.

Alguns estudos propõem formas de identificar eventos críticos e gerar alertas médicos, além de classificá-los em níveis de prioridade [Misra e Sarkar, 2015, Kim e Kim, 2015, Kathuria e Gambhir, 2016]. Outros estudos propõem mecanismos para a transmissão imediata dos alertas [Gündoğdu e Çalhan, 2016, Bhandari e Moh, 2016]. No geral, a identificação dos eventos críticos limita-se a comparar limiares predefinidos para sinais vitais específicos. Além disso, esses trabalhos ignoram os outros fluxos de dados presentes nas redes sem fio. Ainda, poucos trabalhos consideram a integração WBAN e WLAN e seus fluxos de dados [Bradai et al., 2016, Rashwand e Misic, 2015]. Mesmo assim, esses trabalhos classificam os alertas médicos com a mesma prioridade do tráfego de voz de uma WLAN, não oferecendo o tratamento necessário. Em suma, esses estudos ora se preocupam em identificar eventos críticos, ora em transmitir prioritariamente os alertas médicos gerados. Sendo, no melhor do conhecimento desta pesquisa, inexistentes estudos que agregam tanto a identificação quanto a transmissão prioritária dos alertas no contexto WBAN/WLAN.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho possui dois objetivos principais: i) identificar antecipadamente a ocorrência de eventos críticos na saúde dos pacientes e, ii) transmitir prioritariamente os alertas médicos sobre os eventos identificados no contexto híbrido WBAN/WLAN. Além disso, este trabalho auxilia na melhoria do desempenho das WBANs para sua integração com outras redes sem fio, neste caso, com as redes WLANs. Como principal benefício, atrasos e perdas são minimizados durante as transmissões dos alertas médicos.

Para isso, este trabalho apresenta o sistema SANTE (do inglês, *System for Anticipated Identification and Transmission of Medical Alerts on WBAN/WLAN*), um sistema para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos nas WBANs integradas às WLANs. Particularmente, o sistema auxilia a prever tendências no comportamento de sinais vitais sobre a iminência de eventos críticos por meio de um conjunto genérico de indicadores estatísticos. Esses indicadores servem para indicar a ocorrência de eventos críticos, como ataques cardíacos e paradas respiratórias, fundamentados na análise de comportamentos genéricos em séries temporais recentemente identificados em pesquisas científicas [Dakos et al., 2012]. Quando algum evento crítico é indicado, o sistema gera alertas médicos e atribui aos mesmos o maior nível de prioridade de acesso ao meio da WLAN. Para isso, foi criada uma nova categoria de acesso ao meio na WLAN, exclusiva para os alertas, com janela de contenção e intervalo entre quadros (AIFS) reduzidos, a fim de priorizar o tráfego dos alertas. Desse modo, o sistema oferece um tratamento adequado aos dados emergenciais (alertas médicos) e permite que os profissionais da saúde reajam em tempo hábil.

## 1.3 Contribuições

As contribuições desta dissertação englobam, primeiramente, um estudo sobre métodos de identificação de situações críticas em sinais vitais e transmissão de alertas médicos sobre esses eventos para os profissionais da saúde, no contexto das redes WBANs integradas as WLANs. Também apresenta-se um estudo sobre a predição de tendências acerca da iminência de eventos críticos em doenças humanas, como ataques cardíacos, que emprega um conjunto de indicadores estatísticos genéricos. Nesses estudos foram levantados os requisitos desejáveis para o desenvolvimento do sistema proposto de identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos sobre WBANs e WLANs.

Em seguida, a proposta e especificação do sistema SANTE (*System for Anticipated Identification and Transmission of Medical Alerts on WBAN/WLAN*) são apresentadas. O SANTE auxilia na predição da tendência de ocorrer eventos críticos na saúde do paciente, através da análise estatística do comportamento dos sinais vitais, e gera alertas médicos sobre os eventos identificados. Esses alertas recebem o maior nível de prioridade na WLAN para sua transmissão imediata aos profissionais da saúde. A arquitetura do SANTE está organizada em quatro etapas: coleta dos dados, predição de eventos críticos, transmissão prioritária e envio ao destino final. Juntos auxiliam na identificação antecipada de eventos críticos e na transmissão prioritária de alertas médicos no contexto híbrido WBAN e WLAN, contribuindo na integração dessas redes.

Em seu funcionamento, o sistema SANTE emprega um conjunto de indicadores genéricos para auxiliar na identificação antecipada dos eventos críticos na saúde dos pacientes. Tal identificação foi inspirada na teoria de sistemas dinâmicos e suas mudanças críticas, como mudanças climáticas, quedas no mercado financeiro e doenças humanas [Scheffer et al., 2009]. Além disso, SANTE oferece uma nova categoria de acesso na WLAN específica para os alertas médicos, provendo prioridade de acesso ao meio através da redução da janela de contenção e intervalo entre quadro AIFS. Com isso, os alertas possuem prioridade sobre os demais tipos de tráfego presentes no meio sem fio.

Finalmente, esta dissertação apresenta a avaliação de desempenho do sistema SANTE realizada com a ajuda da ferramenta de análises estatísticas R e no simulador de redes NS-3. Na ferramenta R, foi avaliado um conjunto de indicadores genéricos sobre sinais vitais reais de pacientes a fim de auxiliar na predição da iminência de eventos críticos. Para cada evento identificado, alertas médicos foram emitidos e priorizados nas simulações do NS-3, considerando um cenário WBAN/WLAN no contexto de um ambiente doméstico. Por fim, foi feita a análise dos resultados obtidos.

## 1.4 Estrutura do Texto

Este documento está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 descreve os fundamentos relacionados à WBAN necessários para a compreensão do problema tratado. Ele também discorre sobre as redes WLANs, as quais são empregadas no envio dos alertas médicos até seu destino final. E ainda, detalha o processo de identificação da iminência de eventos críticos em doenças humanas. Em seguida, o Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados ao estudo proposto. O Capítulo 4 descreve o sistema proposto, suas etapas e funcionamento. Na sequência, o Capítulo 5 detalha a avaliação de desempenho juntamente com os resultados obtidos. E por fim, o Capítulo 6 conclui o documento, apresentando as considerações finais e direções futuras.

# Capítulo 2

## Fundamentos

Este capítulo apresenta os fundamentos necessários à compreensão do contexto da pesquisa, do problema tratado, e do sistema proposto. Sendo assim, a Seção 2.1 apresenta as características gerais das WBANs, suas aplicações, arquitetura, topologia e requisitos de qualidade de serviço. A Seção 2.2 define as características das WLANs, apresentando seu funcionamento e a arquitetura. Em seguida, a Seção 2.3 aponta as principais diferenças entre as WBANs e as WLANs. Por seguinte, a Seção 2.4 detalha a teoria sobre a predição da iminência de eventos críticos em doenças humanas, e ainda apresenta o conjunto de indicadores genéricos utilizados para auxiliar a predição. E por fim, a Seção 2.5 resume o capítulo.

### 2.1 Redes Corporais sem Fio

As Redes Corporais sem Fio (WBANs), padrão IEEE 802.15.6, consistem em uma coleção de micro ou nano dispositivos, como sensores sem fio, de baixo poder de consumo [Movassaghi et al., 2014]. Esses sensores são posicionados na parte interna ou externa do corpo humano e possuem tecnologias de comunicação sem fio que operam nas proximidades do corpo. Eles monitoram, coletam e enviam dados vitais para as aplicações médicas. Uma vez nas aplicações, os dados são enviados para os profissionais da saúde para diagnóstico médico [Latré et al., 2011]. Através desses sensores, as WBANs em conjunto com as aplicações oferecem um monitoramento contínuo, flexível e ubíquo, para que os pacientes possam continuar com suas atividades cotidianas [Cavallari et al., 2014].

As aplicações médicas auxiliam os cuidados com a saúde, englobando a monitoração contínua, o diagnóstico médico e o desempenho físico humano [Movassaghi et al., 2014]. Por exemplo, na monitoração de pacientes que sofrem de asma, há sensores que coletam e enviam dados sobre os agentes alérgicos contidos no ar para os profissionais da saúde, a fim de auxiliar no tratamento das causas alérgicas da asma. Um segundo exemplo consiste na monitoração contínua dos batimentos cardíacos de pacientes com doenças cardiovasculares, onde a identificação de condições anormais nos batimentos pode preveni-los de ataques repentinos. Além de acompanhar doenças, as aplicações médicas registram o treinamento de atletas. Para esse fim, os sensores monitoram os sinais vitais e os movimentos do corpo humano com o propósito de informar os atletas sobre treinamentos incorretos que podem gerar lesões. As WBANs permitem ainda o acompanhamento militar, auxiliando na monitoração do estado de saúde dos soldados presentes nos campos de batalhas [Latré et al., 2011].

Além da WBAN ser bem aplicada no contexto médico, ela é facilmente adaptada em outros setores como entretenimento, detecção de emoção e emergências não médicas, denominadas como aplicações não médicas [Movassaghi et al., 2014]. Isso é possível, devido aos diferentes

tipos de dados coletados pelos sensores das WBANs, como sinais vitais, movimentos do corpo e características do ambiente em que o paciente se encontra. Por exemplo, em jogos eletrônicos os movimentos do corpo humano são captados e utilizados para interagir com o monitor de jogos. Na detecção de emoção, um aumento na taxa respiratória e batimentos cardíacos resultam em suor nas palmas das mãos, o que indica sensação de medo no usuário. Enquanto em emergências não médicas, sensores posicionados em uma casa detectam emergências, como incêndio, e comunicam o usuário em seu dispositivo móvel sobre tais situações [Latré et al., 2011].

Para ambas as aplicações, as médicas e as não médicas, as WBANs são compostas por três tipos de nós classificados conforme suas funcionalidades: os nós sensores, nós atuadores e nós dispositivos pessoais [Movassaghi et al., 2014]. Os nós sensores monitoram, coletam e enviam os parâmetros fisiológicos do corpo humano, como temperatura e batimentos cardíacos. Os nós atuadores interagem com os pacientes conforme dados recebidos pelos sensores, como por exemplo, injetam insulina no corpo de pacientes diabéticos. Enquanto os dispositivos pessoais atuam como um *gateway*, ou seja, recebem as informações adquiridas pelos sensores e atuadores, como sinais fisiológicos de respiração e quantidade de insulina injetada, e as transmitem para os pacientes e profissionais da saúde [Latré et al., 2011]. Os dispositivos pessoais também são chamados de Unidades de Controle do Corpo (BCU), nó *sink*, nó *gateway* ou ainda, nó coordenador. No geral, eles são representados pelo próprio dispositivo móvel do paciente. Nesse trabalho, utilizamos o nome nó coordenador.

Os sensores das Redes Corporais sem Fio podem ser implantáveis ou vestíveis no corpo humano, a fim de atender diferentes tipos de aplicações [Movassaghi et al., 2014]. Os sensores implantáveis no corpo coletam parâmetros fisiológicos específicos, como quantidade de açúcar no sangue de diabéticos, ou atuam dentro do corpo na injeção de medicamentos. Por isso, esses sensores são posicionados, por exemplo, debaixo da pele ou no fluxo do sangue [Crosby et al., 2012]. Enquanto os sensores vestíveis são instalados sobre o corpo humano e coletam diversos tipos de sinais vitais, como temperatura, pressão do sangue, oxigênio, movimento do corpo, entre outros. Ambos os sensores oferecem mobilidade e flexibilidade, com a finalidade de não causar impactos nas atividades cotidianas dos pacientes [Latré et al., 2011].

### 2.1.1 Arquitetura e Topologia das WBANs

A comunicação entre os diferentes nós da WBAN para o envio dos dados sobre os sinais vitais coletados segue uma topologia em estrela de um ou dois saltos [Association et al., 2012]. No geral, a topologia em estrela possui um nó central, representado pelo nó coordenador da WBAN, comumente posicionado na cintura do corpo humano. Na topologia de um salto, os nós trocam informação diretamente com o nó central da rede. Enquanto, na topologia de dois saltos os nós trocam informação diretamente com o coordenador ou através de um segundo nó posicionado mais próximo do coordenador. Dessa maneira, o nó central controla o acesso ao meio, gerencia o poder de energia dos sensores e atuadores, e encaminha os dados coletados pelos sensores para os centros de saúde [Movassaghi et al., 2014].

Na topologia em estrela de um salto todos os nós se conectam com o nó coordenador. Por possui maior poder de transmissão e energia, o nó coordenador se responsabiliza pela comunicação com o ponto de acesso (*Access Point* - AP) para transmissão dos dados vitais até os centros de saúde [Movassaghi et al., 2014]. Em uma topologia multissaltos o atraso no envio dos dados é maior quando comparado à topologia de um salto, devido à quantidade de nós que a informação passa até chegar ao coordenador da WBAN. Como a baixa latência consiste de um requisito crucial para as aplicações WBANs, a última versão do padrão IEEE 802.15.6 calculou que a WBAN suporta uma topologia de até dois saltos em sua comunicação [Association et al., 2012].

Neste sentido, a arquitetura típica de uma WBAN segue uma topologia em estrela de um salto, ilustrado na Figura 2.1. Nesta arquitetura, diferentes nós sensores monitoram, coletam e enviam os sinais vitais do paciente para o coordenador da WBAN [Latré et al., 2011]. Essa comunicação, conhecida como comunicação *intra-body*, emprega tecnologias sem fio de curto alcance, como ZigBee e Bluetooth. Uma vez no coordenador, representado pelo dispositivo móvel do paciente, os dados são processados se necessário e encaminhados para o ponto de acesso via WiFi. Denomina-se comunicação *inter-body* a comunicação entre o coordenador e o AP. Por fim, o AP envia os dados vitais para os profissionais da saúde e centros hospitalares, via Internet ou Ethernet, para realização do diagnóstico médico [Movassaghi et al., 2014].

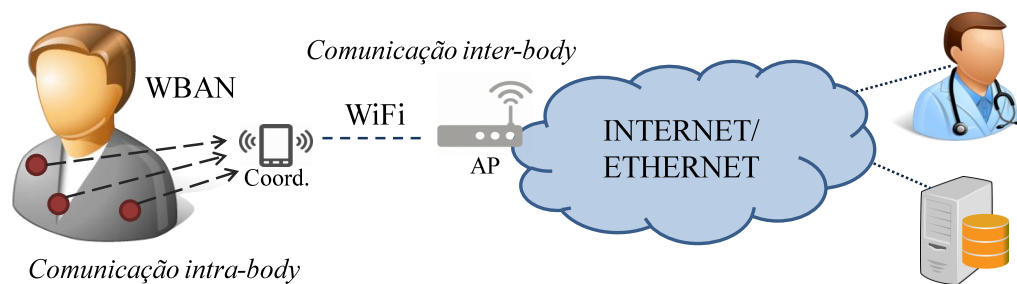


Figura 2.1: Arquitetura WBAN

Desde a aquisição dos dados pelos sensores até a sua transmissão ao destino final, diversas redes e tecnologias são utilizadas [Latré et al., 2011]. Dentre elas podem ser empregadas tecnologias como ZigBee, Redes de Sensores sem Fio (*Wireless Sensor Networks*- WSN), Bluetooth, Redes Locais sem Fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN), Redes Pessoais sem Fio (*Wireless Personal Area Network* - WPAN), redes celulares (exemplo 3G), entre outras [Movassaghi et al., 2014]. Isso é necessário devido aos diferentes tipos de comunicação, alcance de transmissão e poder de energia dos diferentes tipos de dispositivos empregados nas WBANs. Por exemplo, um nó sensor possui baixo poder de energia e alcance de transmissão, suportando no máximo comunicações com três metros de distância. Por isso, os sensores utilizam ZigBee ou Bluetooth [Crosby et al., 2012]. Enquanto o nó coordenador da WBAN (i.e., dispositivo móvel do paciente) possui menores restrições de energia, podendo alcançar maiores distâncias para transmissão. Logo, o coordenador pode empregar redes com maior alcance como WLAN. Por essa razão, as WBANs devem ser capazes de interagir com outras redes e tecnologias, respeitando os limites e especificações de cada uma.

### 2.1.2 O Padrão IEEE 802.15.6

As WBANs foram criadas para satisfazer os requisitos de comunicação dos dispositivos e aplicações médicas. Essas redes devem suportar a combinação confiabilidade, Qualidade de Serviço (QoS), baixo consumo de energia, baixa taxa de dados e mínimas interferências, para assim abordar amplamente as aplicações médicas [Movassaghi et al., 2014]. Por outro lado, as WPANs interconectam dispositivos ligados ao corpo humano para troca de informação, entretanto as WPANs não satisfazem os requisitos de comunicação dos dispositivos médicos, como sensores, pois não suportam proximidade ao tecido corporal. Em função disso, foi necessária a criação de um modelo padrão para a implementação das WBANs, englobando desde eletrônicos de consumo, como jogos interativos, à aplicações médicas [Association et al., 2012].

Em maio de 2008 foi estabelecido um grupo de tarefas da IEEE (*Task Group 802.15.6* - TG6) para definir um padrão especificamente designado para WBANs, nomeado IEEE 802.15.6.

A última versão do padrão foi ratificada em fevereiro de 2012 [Association et al., 2012]. O principal objetivo desse grupo consiste em desenvolver um padrão internacional para dispositivos com baixo poder de energia que operam sobre, dentro ou em torno do corpo humano, mas não limitado aos humanos. Esse padrão deve atender a uma variedade de aplicações, incluindo médicas, eletrônicas, entretenimento pessoal, militar, entre outras [Movassaghi et al., 2014]. Para isso, a WBAN é uma rede de pequena escala, com restrições de energia e curto alcance de transmissão, que requer apenas alguns metros de distância para realizar a comunicação entre os sensores [Cavallari et al., 2014].

O padrão IEEE 802.15.6 possui um conjunto de requisitos definidos pelo grupo TG6. Entre esses requisitos consta que uma WBAN suporta no máximo 256 nós incluindo sensores e atuadores, que devem ser removidos e adicionados na rede em menos de 3 segundos. Esses nós devem suportar uma comunicação confiável, mesmo quando o usuário está em movimento, onde dados não podem ser perdidos devido à instabilidade no canal [Movassaghi et al., 2014]. A latência dessas redes deve ser menor que 125 milissegundos para aplicações médicas e menor que 250 milissegundos para aplicações não médicas. E ainda, essas redes devem ser capazes de operar em ambientes heterogêneos, onde diferentes padrões de tecnologias sem fio cooperam uns com os outros para troca de informação. Além do mais, a WBAN deve suportar taxas de dados de até 10 Mbps para diferentes conjuntos de aplicações [Association et al., 2012].

Um requisito importante da WBAN consiste no suporte a QoS, como por exemplo, no fornecimento de mensagens emergenciais (i.e., alertas médicos) quando situações anormais são detectadas [Association et al., 2012]. Essas mensagens requerem acesso rápido ao meio sem fio para sua transmissão imediata aos profissionais de saúde, sendo sensíveis à perda e latência [Latré et al., 2011]. Em função disso, tais alertas médicos requerem tratamentos especiais que priorizem sua transmissão, a fim de oferecer suporte eficaz à monitoração contínua e diagnóstico médico [Cavallari et al., 2014].

### 2.1.3 Priorização dos Alertas Médicos nas WBANs

As mensagens emergenciais alertam os médicos sobre situações anormais na saúde dos pacientes [Association et al., 2012]. Tais situações compreendem desestabilizações consideradas críticas nos sinais vitais, como aumento considerável na frequência cardíaca. Logo, elas podem se tornar fatal, se não enviadas imediatamente [Dangi e Panda, 2016]. No geral, os sensores das WBANs detectam essas situações críticas através de limiares particulares dos sinais vitais. Assim, quando os sinais extrapolam seus limiares, os sensores definem a informação como emergencial e a transmitem com urgência para os centros hospitalares. Por isso, um tratamento especial para os alertas médicos é considerado um requisito crucial de QoS nas WBANs [Bhandari e Moh, 2016].

Para atender aos requisitos de QoS dos alertas médicos, o TG6 define oito níveis de prioridades para os diferentes fluxos de dados presentes nas WBANs (ilustrados na Tabela 2.1) [Association et al., 2012]. Os fluxos de dados sobre sinais vitais coletados pelos sensores recebem os maiores níveis de prioridade. Por isso, o nível 5 engloba dados vitais não contínuos (como temperatura). O nível 6 compreende dados vitais sob demanda e contínuos (como ECG). Enquanto, o nível mais alto de prioridade atende aos dados emergenciais (como alertas médicos), que aceitam no máximo 125 ms de latência [Movassaghi et al., 2014]. Os demais fluxos de dados, como voz, vídeo e tráfego normal de rede (*background*), recebem os menores níveis de prioridade por aceitarem maiores latências quando comparado aos dados sobre sinais vitais.

Essas prioridades são empregadas no controle de acesso ao meio da WBAN, respeitando o tipo de tráfego e seu nível prioritário [Latré et al., 2011]. Cada categoria possui um tamanho específico em sua janela de contenção onde as mensagens emergenciais possuem a menor janela



Tabela 2.1: Mapeamento prioritário da WBAN [Association et al., 2012]

<b>Tráfego</b>	<b>Prioridade</b>
Dados vitais emergenciais	7
Dados vitais prioritários ou de rede	6
Dados vitais ou controle de rede	5
Voz	4
Vídeo	3
<i>Excellent effort</i> (usuários importantes)	2
<i>Best effort</i> (usuários gerais)	1
<i>Background</i> (tráfego normal de rede)	0

de contenção, a fim de favorecer o seu acesso ao meio [Association et al., 2012]. Para transmissão dos dados, no geral, os sensores se comunicam com o nó coordenador da WBAN para verificar a disponibilidade do canal. Os sensores que possuem alertas médicos para transmissão utilizam um campo no cabeçalho do quadro exclusivo para tráfego emergencial, chamado de fase de acesso exclusivo. Assim, por meio desse campo exclusivo o tráfego de alertas médicos recebe tratamento prioritário sobre os demais tipos de tráfego da rede [Movassaghi et al., 2014].

No entanto, as WBANs possuem desafios ligados ao tratamento das mensagens emergenciais (i.e. alertas médicos) [Association et al., 2012]. Dentre eles, há a complexidade das janelas de contenção conforme prioridades e seu alto consumo de energia no controle de acesso ao meio [Kim e Kim, 2015]. Existem também desafios relacionados à identificação de alertas médicos nos diversos sinais vitais, para que não haja erros e a necessidade de conhecimentos específicos sobre cada sinal monitorado [Kathuria e Gambhir, 2016]. E ainda, a integração das WBANs com as outras redes e tecnologias sem fio empregadas no envio dos dados vitais até o seu destino final. Essa integração requer a aplicação das categorias prioritárias das WBANs nas configurações de acesso ao meio das outras redes utilizadas na transmissão [Bradai et al., 2016]. Pois, apesar das WBANs possuírem prioridades de transmissão, elas não são aplicadas nas outras redes sem fio, como WLANs, utilizadas no envio dos alertas médicos até os centros de saúde. Desse modo, avanços ainda precisam ser feitos no tratamento dos alertas médicos.

## 2.2 Redes Locais sem Fio

As redes sem fio estão sendo cada vez mais utilizadas na comunicação entre dispositivos dos mais variados tipos e tamanhos (como computadores pessoais, portáteis e de mão, telefones, eletrodomésticos, máquinas industriais, sensores e outros) em diferentes ambientes [Banerji e Chowdhury, 2013]. Essas redes têm sido utilizadas nos mais variados cenários, desde soluções para redes residenciais e de campus, como em enlaces ponto-a-ponto de média distância em soluções corporativas. Por permitirem mobilidade, estas redes facilitam a ubiquidade do poder computacional, tornando transparente a disseminação da informação. Em virtude disso, diferentes padrões e tecnologias de redes sem fio surgiram nos últimos anos para acomodar esta vasta gama de aplicações e coberturas, dentre elas estão as Redes Locais sem Fio (WLANs), também conhecidas como Wi-Fi [Kurose e Ross, 2013].

As WLANs proveem mobilidade e flexibilidade aos dispositivos e usuários, abrangendo áreas de 150 a 300 metros de cobertura em ambiente densos [Kurose e Ross, 2013]. Hoje é comum encontrar essas redes em diversos locais públicos como bares, lanchonetes, *shoppings*, cafés, livrarias e aeroportos. Algumas das razões do enorme sucesso das WLANs abrangem a sua

diversidade em termos de capacidade e cobertura, baixo custo dos dispositivos de rede, suporte à mobilidade, facilidade de desenvolvimento e vasta aplicabilidade. Devido à grande quantidade de dispositivos e produtos empregados nessas redes, o IEEE criou o padrão IEEE 802.11, a fim de garantir compatibilidade entre os mesmos. Esse padrão especifica diversas normas para as WLANs, como modo de operação e camada de acesso ao meio [Banerji e Chowdhury, 2013].

### 2.2.1 O Padrão IEEE 802.11

O IEEE, em 1990, criou a primeira versão do padrão 802.11 que determina as normas para uso e criação das Redes Locais sem Fio [IEEE, 2012]. O padrão especifica a camada física e de controle de acesso ao meio (MAC) dos dispositivos para conectividade sem fio. Por essas redes estarem presentes em diversos locais, como residências, instituições acadêmicas e ambientes públicos, elas se tornaram uma das mais importantes tecnologias de rede de acesso a Internet. Por consequência, esse padrão continua em desenvolvimento através de vários grupos de trabalho com o intuito de melhorar o desempenho da rede e oferecer novas aplicações [Kurose e Ross, 2013].

Em suma, desde 1990 diversas emendas do padrão 802.11 têm sido desenvolvidas, entre elas 802.11b, 802.11a, 802.11g e 802.11n [Banerji e Chowdhury, 2013]. Esses padrões compartilham características em comum como: todos usam o mesmo protocolo de acesso ao meio CSMA/CA baseado no método "escute antes de falar", usam a mesma estrutura de quadro da camada de enlace e possuem a capacidade de reduzir sua taxa de transmissão para alcançar distâncias maiores [Kurose e Ross, 2013]. Apesar das semelhanças, tais padrões possuem algumas particularidades, como em suas faixas de frequência e taxas de dados, variando conforme os objetivos e recursos adicionados ao padrão. Por exemplo, enquanto o padrão 802.11n alcança taxas de transmissão de centenas de megabits por segundo, o padrão atual 802.11ac possibilita atingir velocidades de 433 Mb/s à 6 Gb/s [IEEE, 2012]. Em 2014 o IEEE aprovou a formação de um grupo de trabalho para o desenvolvimento da nova versão 802.11ax, a qual oferece velocidades em torno de 10Gb/s, alta eficiência e compatibilidade com versões anteriores. Seu objetivo é oferecer conectividade em determinados ambientes densos, como em estádios de futebol com milhares de dispositivos conectados ao mesmo tempo [Bellalta, 2016].

#### Características do Padrão 802.11

As redes 802.11 podem operar em modo de infraestrutura ou em modo *ad hoc* [Kurose e Ross, 2013]. A arquitetura dessas redes consiste em vários componentes que interagem para prover uma rede sem fio com suporte à mobilidade [IEEE, 2012]. Conforme Figura 2.2, uma típica WLAN, no modo de infraestrutura, possui áreas de coberturas denominadas conjuntos básicos de serviço (BSS). Cada BSS possui uma ou mais estações sem fio, onde uma delas é a estação sem fio central, conhecida como ponto de acesso (AP). As demais estações compreendem diversos tipos de dispositivos, como dispositivos móveis e computadores pessoais, trocando informações na rede. Cada estação sem fio precisa se associar com o AP central para poder enviar ou receber dados. Por fim, o AP se conecta com um dispositivo de interconexão, como um comutador ou roteador, que, por sua vez, leva os dados à Internet [Kurose e Ross, 2013].

Neste contexto, quando as estações sem fio estão associadas a um ponto de acesso diz-se que estão operando em modo de infraestrutura (ilustrado na Figura 2.1). Pois nesse modo, a rede em que as estações estão conectadas por meio do AP oferece todos os serviços tradicionais de rede, como atribuição de endereço e roteamento. Enquanto no modo *ad hoc*, ilustrado na Figura 2.3, as estações sem fio não dispõem de qualquer infraestrutura desse tipo, como APs, para se conectar. Esse modo é composto somente por estações sem fio dentro de um mesmo

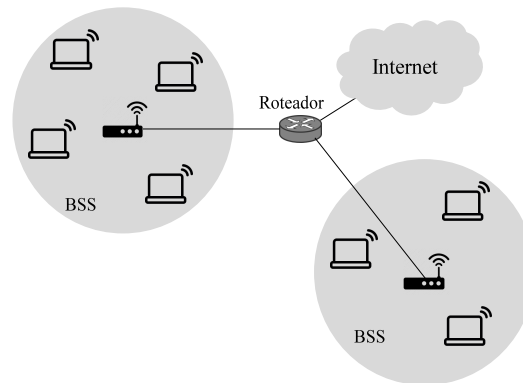


Figura 2.2: Arquitetura WLAN [Kurose e Ross, 2013]

BSS que se comunicam entre si. Assim, as próprias estações proveem serviços de rede, como roteamento, para troca de informação [Banerji e Chowdhury, 2013].

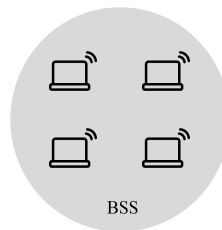


Figura 2.3: Rede *ad hoc* 802.11 [Kurose e Ross, 2013]

Como nas redes sem fio o meio é compartilhado, transmissões concorrentes podem interferir umas nas outras e causar colisões [Banerji e Chowdhury, 2013]. A fim de controlar as transmissões, o 802.11 define funções de acesso ao meio, entre elas a função de coordenação distribuída (DCF) e a função de coordenação híbrida (HCF) [Kurose e Ross, 2013]. O DCF é o mecanismo básico da camada MAC, sendo baseado no protocolo de acesso ao meio CSMA/CA que segue a abordagem "escute antes de falar", para evitar colisões. A HCF foi inserida a partir da versão 802.11e e com adição de suporte a QoS. Além disso, o 802.11 emprega técnicas de prevenção de colisões, como reconhecimento positivo (*Acknowledgement* - ACK) e reserva inteligente do canal para quadros maiores [IEEE, 2012].

No funcionamento geral do DCF, a estação que quer transmitir um quadro precisa ouvir o meio. Caso o meio esteja ocioso, após um curto período de tempo chamado espaço entre quadros (IFS) e um processo de *backoff*, a estação transmite. Caso contrário, a transmissão é adiada e inicia-se um novo processo de *backoff*, no qual é sorteado para a estação um tempo aleatório uniformemente distribuído entre zero e o tamanho da janela de contenção (CW). Esse temporizador é decrementado periodicamente quando não há nenhuma estação transmitindo, sendo parado quando detectada alguma transmissão no meio. Quando o tempo de *backoff* zera, a estação transmite o quadro. A estação receptora, após recebimento do quadro e um período de tempo IFS, devolve um ACK caso não haja erros no quadro recebido [Kurose e Ross, 2013]. Caso a estação transmissora não receba esse quadro ACK, deduzirá que houve uma colisão e escalonará uma retransmissão. Para reduzir a probabilidade de colisões, a janela de contenção possui um valor mínimo dado por  $CW_{min}$  e a cada transmissão não sucedida essa janela aumenta, até que seja atingido um valor máximo dado de  $CW_{max}$ . Quando o número máximo de retransmissões é alcançado, descarta-se o quadro de dados [IEEE, 2012].

Adicionalmente, o DCF permite reservar o meio sem fio para transmissão de dados através da troca de quadros de controle RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) do protocolo CSMA/CA [Kurose e Ross, 2013]. Esses quadros contêm informações a respeito da estação receptora, do tempo necessário para envio do quadro de dados e seu respectivo ACK. Eles se resumem a pedidos e permissões, onde o quadro RTS questiona a estação receptora se o canal está livre para envio e o CTS informa a estação transmissora que o canal está livre para recebimento do quadro de dados. Após envio do quadro CTS, o canal é reservado durante período de tempo necessário para transmissão do quadro, a fim de evitar colisões [Banerji e Chowdhury, 2013]. No geral, as estações empregam os quadros RTS e CTS para transmissão de quadros de dados mais longos, sendo opcional seu uso no controle de acesso ao meio do 802.11.

O padrão 802.11 provê também serviços de QoS para as aplicações em tempo real, como conferências multimídia e transmissão de voz [Wu et al., 2006]. Na função de acesso ao meio HCF há o modo de operação EDCA (*Enhanced Distributed Coordination Access*), uma extensão do DCF que implementa mecanismos de diferenciação de serviços. O EDCA separa o tráfego em quatro categorias de acesso (*Access Category - AC*), para que o tráfego prioritário seja favorecido no meio. Conforme Tabela 2.2, cada AC recebe um valor específico em sua janela de contenção e um espaço de tempo entre quadros arbitrário (*Arbitration Inter-frame Space - AIFS*). Basicamente, quanto menor forem os valores desses parâmetros, menor será o retardo para que a estação acesse o meio. Dessa forma, os dados de voz recebem a maior prioridade, enquanto os dados normais de rede compreendem o menor nível prioritário [Banerji e Chowdhury, 2013].

Tabela 2.2: Parâmetros do EDCA

<b>Categoria EDCA</b>	<b>Janela Inicial</b>	<b>Janela Máxima</b>	<b>AIFS</b>
AC_VO (Voz)	4	8	2
AC_VI (Vídeo)	8	16	2
AC_BE (Normal)	16	1024	3
AC_BK (Segundo plano)	16	1024	7

Vale ressaltar que as WLANs ainda não possuem técnicas de priorização para tráfego de dados das aplicações médicas. Sendo que as aplicações médicas das redes WBANs dependem de outras redes sem fio para transmitir os dados vitais até o seu destino final [Movassaghi et al., 2014]. Como apresentado na seção 2.1, desde a aquisição dos dados pelos sensores até o envio aos profissionais da saúde outras tecnologias e redes são utilizadas, uma delas pode ser as WLANs. Por exemplo, as WLANs são bem empregadas em um cenário hospitalar, onde os sinais vitais do paciente são monitorados pelas aplicações médicas por meio de sensores e enviados ao ponto de acesso do próprio hospital, o qual pode estar a dezenas ou centenas de metros de distância. Por isso, estudos ainda são necessários sobre a integração dessas redes [Cavallari et al., 2014].

## 2.3 Diferenças entre WBAN e WLAN

As redes WBAN são um tipo especial de redes de sensores sem fio que operam nas proximidades (até 5 metros) do corpo humano. Essas redes suportam dispositivos miniaturizados implantáveis ou vestíveis no corpo, como sensores, capazes de monitorar remotamente a saúde dos pacientes [Movassaghi et al., 2014]. Por outro lado, as redes WLANs compreendem um tipo de rede sem fio que atinge distâncias de 150 a 300 metros de cobertura em ambientes densos, atuando em ambientes empresariais, acadêmicos, públicos, entre outros. Seus dispositivos são

dos mais variados tipos, como dispositivos móveis e fixos, computadores pessoais, equipamentos industriais, entre outros [Kurose e Ross, 2013].

As WLANs alcançam taxas de transmissão de centenas de megabits por segundo, enquanto as WBANs atingem até 10 Mbps/s. Ambas as redes oferecem suporte à mobilidade e empregam mecanismos de acesso ao meio. O protocolo de acesso ao meio da WLAN tem como base o método CSMA/CA [Kurose e Ross, 2013], porém esse protocolo é ineficiente nas WBANs em função de consumir muita energia dos sensores para troca de informações de controle. Por isso, muitos protocolos MAC das WBANs se baseiam em topologia estrela e em métodos com divisão no tempo, onde o coordenador da rede se responsabiliza por controlar o acesso ao meio. Ou ainda, empregam o método *polling*, onde cada sensor possui um tempo específico para realizar sua transmissão, também controlado pelo coordenador. Em suma, diversos protocolos MAC foram propostos para as WBANs, entretanto ainda existem muitos desafios para serem superados, como economia de energia, confiabilidade e interferências [Movassaghi et al., 2014].

As WBANs possuem menor abrangência que as WLANs, mas devido as características do corpo humano seu nível de complexidade aumenta. Os movimentos do corpo podem causar interferência ou alteração no posicionamento do sensor. Também, devido aos sensores serem implantáveis em alguns casos, sua recarga de energia se torna mais difícil [Movassaghi et al., 2014]. Desse modo, diversos desafios existem nas WBANs como problemas de QoS, controle de acesso ao meio, segurança, confiabilidade, consumo de energia, entre outros [Cavallari et al., 2014]. Em contrapartida, as WLANs já superaram inúmeros desafios, porém a nova emenda do padrão está em busca de maiores taxas de transmissão e eficiência em ambientes densos, como estádios de futebol [Bellalta, 2016]. Sendo assim, ambas as redes requerem estudos para melhorar cada vez mais seus desempenhos e oferecer uma melhor experiência para os usuários.

## 2.4 Predição de Eventos Críticos em Doenças Humanas

Esta seção descreve a predição da tendência de eventos críticos que tem sido explorada em diversos sistemas como clima, mercado financeiro e doenças humanas. Esses eventos consistem de situações graves que causam sérias consequências no estado do sistema, como um tsunami, uma queda de mercado e uma depressão. O estado do sistema compreende um conjunto de valores, como sinais vitais de batimentos cardíacos, que abrange faixas de valores estáveis e críticos. Quando esses sistemas apresentam mudanças graves e inesperadas, também conhecidas por transições críticas [Dakos et al., 2012], significa que o estado do sistema alterou de uma faixa de valores estáveis para uma faixa de valores críticos, onde acontecem os eventos críticos. Por exemplo, no clima ocorrem alterações bruscas que levam a tempestades e enchentes; no mercado financeiro sucedem as quedas de mercado; e na medicina acontecem falhas espontâneas como ataques de asma e crises epiléticas. Dessa maneira, essas transições críticas desencadeiam eventos críticos que geram um grande impacto no sistema [Scheffer et al., 2009], sendo que na medicina tais eventos podem resultar em consequências desastrosas na vida dos pacientes.

Nas doenças humanas, as transições críticas forçam o estado estável da doença (conjunto de valores, como a frequência dos batimentos cardíacos) ultrapassar de forma repentina limites críticos, sendo interpretados como mudanças abruptas no estado da saúde do paciente [van de Leemput et al., 2014]. Essas transições provocam eventos considerados críticos, como depressão e asma. Esses eventos são difíceis de prever, pois não apresentam características e sintomas prévios. Por exemplo, as doenças crônicas e depressão apresentam as transições críticas com episódios de ataques, tais como arritmia cardíaca, ataques epiléticos, desordem bipolar e enxaqueca, sem sintomas prévios aparentes [Rikkert et al., 2016].

As pesquisas médicas apontam que os pacientes apresentam sintomas apenas quando as doenças já se encontram em estágios avançados [Health Organization, 2015]. Devido a isso, e à apresentação de poucos sinais na saúde do paciente prévio as transições críticas, a predição da tendência de eventos críticos se embasa em um conjunto de indicadores estatísticos genéricos. Esses indicadores apresentam um conjunto de comportamento específico momentos próximos a ocorrência das transições (como ataque cardíaco e parada respiratória) [Scheffer et al., 2009]. Esse conjunto de comportamento acontece devido a fenômenos genéricos, precisamente ao fenômeno *Critical Slowing Down* (CSD). Tal fenômeno aponta quando uma transição está se aproximando do estado do paciente [Dakos et al., 2012].

O CSD consiste do tempo levado durante a recuperação do estado da saúde do paciente após perturbações, como desmaios, pressão alta e aplicação de medicamentos [Rikkert et al., 2016]. Essas perturbações levam o estado da saúde (conjunto de valores, como sinais vitais) se aproximar dos seus limites críticos, que quando ultrapassados ocasionam uma transição crítica [Dakos et al., 2012]. Também, tais perturbações levam a perda da resiliência na saúde do paciente (ilustrada na Figura 2.4), deixando-a enfraquecida para suportar novas perturbações. Dessa forma, a proximidade dos limiares e a perda da resiliência tendem a aumentar o tempo levado para recuperação da estabilidade após perturbações. Esse aumento no tempo caracteriza o CSD, fazendo com que um conjunto de indicadores genéricos apresente um comportamento comum à medida que o estado da saúde se aproxima de uma transição crítica [Scheffer et al., 2009].

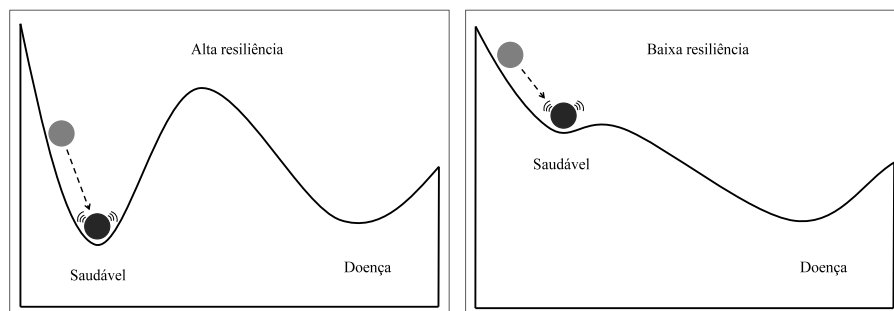


Figura 2.4: Perda da resiliência no estado da saúde após perturbações (os círculos representam o estado da saúde e sua movimentação) [Rikkert et al., 2016].

O conjunto de indicadores genéricos engloba medidas estatísticas, como autocorrelação e desvio padrão, que apresentam um comportamento comum no histórico da tendência das suas curvas [Dakos et al., 2012]. Esse comportamento aparece apenas quando o estado da saúde do paciente se aproxima das transições críticas e possibilita prever a tendência de ocorrer ataques agudos e exacerbações em doenças humanas. Tais doenças, como asma, depressão e distúrbios crônicos, possuem uma constatação em comum: o risco de ocorrer transições críticas está associado à lentidão na recuperação da estabilidade após perturbações (i.e. ao CSD) [Rikkert et al., 2016]. Isso permite empregar os indicadores genéricos, detalhados na próxima subseção, na previsão de eventos críticos na saúde dos pacientes.

### 2.4.1 Conjunto de Indicadores Genéricos

O conjunto de indicadores genéricos fundamentados em resultados de pesquisas científicas realizadas nos últimos anos prevê tendências sobre a iminência de eventos críticos [Scheffer et al., 2009]. Esses indicadores apontam um evento crítico na saúde dos pacientes

quando um conjunto de tendências específicas são encontradas nas curvas resultantes de um curto histórico desses indicadores. A relação entre essas tendências foi detalhada em resultados das pesquisas científicas [Dakos et al., 2012, Rikkert et al., 2016]. Cada um desses indicadores tende a apresentar um aumento ou uma queda na tendência da sua curva quando o estado da doença (valores dos sinais fisiológicos) se aproxima de transições críticas. Dessa forma, o aparecimento do comportamento específico dos indicadores ocorre apenas próximo das transições.

Esse conjunto de indicadores engloba diferentes medidas estatísticas, entre elas estão autocorrelação, taxa de retorno (representando o CSD), variância, assimetria e curtose [Dakos et al., 2012]. Essas medidas refletem alterações nas propriedades das séries temporais (i.e., valores dos sinais fisiológicos) observadas, a fim de prever mudanças abruptas no estado da saúde do paciente. Para isso, a tendência resultante do histórico das curvas dessas medidas quantifica a probabilidade do estado da saúde estar se aproximando de uma transição crítica. Sendo este, o principal objetivo dos indicadores genéricos.

No comportamento específico das tendências dos indicadores, um aumento na **autocorrelação**, com curta defasagem no tempo, é esperado para identificar a iminência de um evento crítico. Estatisticamente, a autocorrelação estima o grau de associação entre um conjunto de valores com ele mesmo ao longo do tempo. Com isso, analisa-se a intensidade que os valores aumentam (ou diminuem) na escala temporal, sendo que quanto mais forte a autocorrelação, maior a tendência dos valores continuarem aumentando (ou diminuindo) [Morettin e Bussab, 2010]. Os gráficos A e B da Figura 2.5 ilustram exemplos de uma autocorrelação fraca e forte, respectivamente. Para quantificar a força da autocorrelação, e dos outros indicadores, utiliza-se o coeficiente de correlação *Kendall tau*, que varia entre -1 e +1. Esse coeficiente mede a força da tendência dos indicadores, isto é, a intensidade que a curva do indicador aumenta ou diminui ao longo do tempo [Dakos et al., 2012]. Assim, quanto mais próximo de +1 for o resultado do *Kendall tau*, maior a força da tendência do indicador. O gráfico C da Figura 2.5 apresenta uma curva elevada da autocorrelação com *Kendall tau* próximo de +1, sendo esse o comportamento esperado para a predição de um evento crítico.

Com base nisso, a medida da autocorrelação é a maneira mais simples de medir o fenômeno CSD, ela tende a aumentar conforme o estado da doença se aproxima gradualmente dos limites críticos, indicando que o estado de saúde do paciente se tornou mais similar entre observações consecutivas [Dakos et al., 2012]. Por exemplo, uma pessoa em estágios iniciais de depressão, com o estado da depressão próximo à transição crítica, tem uma recuperação de humor lenta após perturbações estressantes. Isto resulta em um aumento na autocorrelação do estado de humor nos momentos subsequentes [van de Leemput et al., 2014]. Uma forma de estimar a autocorrelação é através de um modelo autorregressivo (AR(1)), ou por meio da estimação do primeiro valor da função da autocorrelação ilustrada na Equação 2.1 retirada de [Dakos et al., 2012], onde  $\rho_1$  é a autocorrelação,  $E$  é processo estocástico,  $\mu$  é a média,  $\sigma^2$  é a variância e  $z_t$  é o valor do conjunto de dados analisado.

$$\rho_1 = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+1} - \mu)]}{\sigma_z^2} \quad (2.1)$$

A **taxa de retorno** expressa o fenômeno CSD. Essa taxa representa o tempo levado durante a recuperação do estado de saúde do paciente após perturbações, tais como movimentos do corpo, ingestão de medicamentos e frequência cardíaca elevada. Essas perturbações impulsionam o estado da saúde se aproximar dos limites críticos. Com isso, o tempo de recuperação aumenta à medida que a transição crítica se aproxima. Os gráficos A e B da Figura 2.6 exemplificam o tempo de recuperação do estado de saúde do paciente à estabilidade, sendo que o gráfico B apresenta um tempo de retorno maior devido à baixa resistência do paciente causada pelas perturbações. Dessa

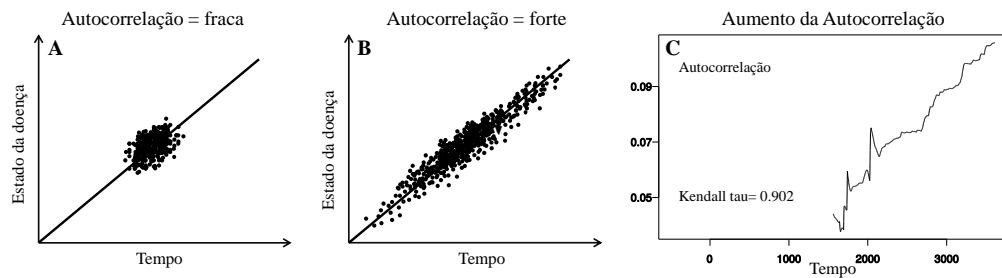


Figura 2.5: Indicador estatístico: autocorrelação. Os gráficos **A** e **B** ilustram exemplos de uma autocorrelação fraca e forte, respectivamente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico **C** apresenta o comportamento esperado da curva do indicador de autocorrelação para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012].

forma, uma queda na taxa de retorno (gráfico C da Figura 2.6) indica lentidão na recuperação da estabilidade, e por consequência aponta um possível evento crítico no futuro próximo. A estimação da taxa de retorno compreende o inverso do termo de primeira ordem do modelo autorregressivo empregado na estimação da autocorrelação, detalhada em [Dakos et al., 2012].

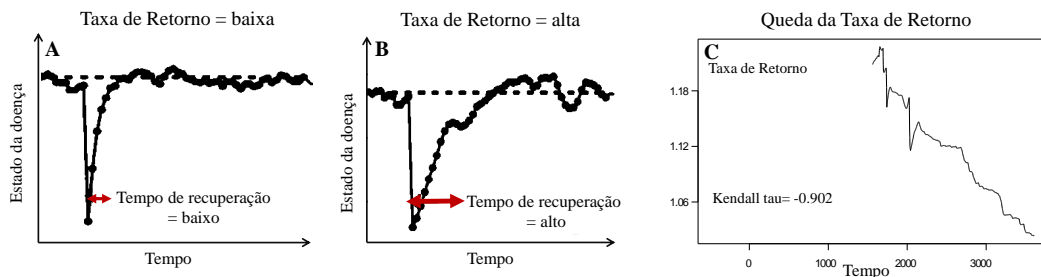


Figura 2.6: Indicador estatístico: taxa de retorno. Os gráficos **A** e **B** apresentam taxas de retorno baixa e alta, respectivamente, após perturbações no estado de saúde do paciente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico **C** apresenta o comportamento esperado da curva da taxa de retorno para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012].

O aumento no tempo levado para recuperação da estabilidade próximo a uma transição crítica faz com que o estado de saúde do paciente (como os valores de batimentos cardíacos) altere amplamente em torno de um estado estável. Conforme gráfico B da Figura 2.7, isso provoca um aumento considerável na **variância** das observações. Além disso, fortes perturbações impulsionam o estado da saúde a se aproximar dos limiares críticos, que levam as transições críticas. Devido a isso, a variância tende a aumentar próximo das transições (ilustrado no gráfico C da Figura 2.7). Estatisticamente, a variância representa a variabilidade de um conjunto de observações, considerada normal quando a maioria das observações se encontram próximas da média ( $\mu$ ) de sua distribuição (gráfico A da Figura 2.7) e considerada alta quando os valores alteram amplamente em torno da média (gráfico B da Figura 2.7). Assim, a medida da variância consiste do segundo momento em torno da média de uma distribuição, estimada conforme Equação 2.2 [Mattos et al., 2017]. Ademais, a variância pode ser obtida a partir da função de desvio padrão (raiz quadrada da variância) apresentada na Equação 2.3 [Dakos et al., 2012]. As notações matemáticas de ambas as equações representam a variância ( $Var(x)$  ou  $\sigma^2$ ), o desvio padrão ( $SD$ ), a média aritmética do conjunto das observações ( $\mu$ ), o valor do conjunto de dados analisado ( $z$ ) e o número de valores do conjunto de dados ( $n$ ).



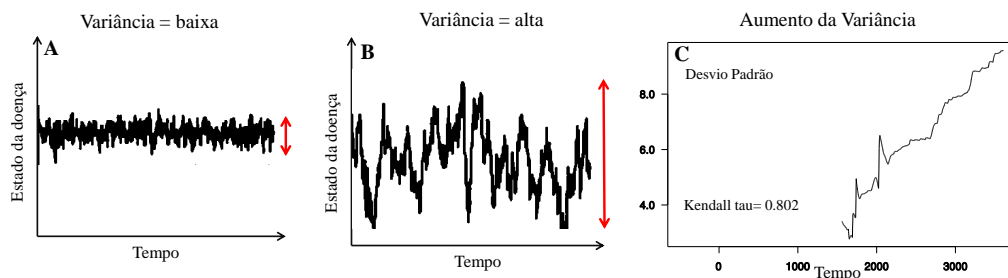


Figura 2.7: Indicador estatístico: variância. Os gráficos **A** e **B** demonstram exemplos de dados com baixa e alta variância, respectivamente [Rikkert et al., 2016]. O gráfico **C** apresenta um aumento da variância, sendo esse o comportamento esperado para predição de evento crítico [Dakos et al., 2012].

$$Var(x) = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \mu)^2}{n} \quad (2.2)$$

$$SD = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \mu)^2 \quad (2.3)$$

Além da autocorrelação, taxa de retorno e variância, a **assimetria** da distribuição das observações tende a aumentar quando o estado de saúde do paciente está próximo dos limiares críticos [Scheffer et al., 2009]. Isso ocorre, pois nos limiares críticos existe um estado instável onde o estado da saúde fica alterando em torno dele. Em função disso, o estado de saúde tende a permanecer próximo desse estado crítico, distanciando-se cada vez mais da estabilidade. Essa permanência em torno do estado crítico provoca um aumento na assimetria na curva da distribuição das observações. Adicionalmente, a assimetria pode aumentar ou diminuir (assimétrica positiva ou negativa) dependendo se a transição crítica do estado de saúde do paciente tende para um estado maior ou menor em relação ao estado atual estável [Dakos et al., 2012].

Estatisticamente, a assimetria informa a igualdade ou desigualdade da distribuição das observações em torno da média (estado de saúde considerado estável). A maneira mais simples de avaliar a assimetria consiste na comparação de três medidas de tendência central: a média ( $\mu$ ), a mediana ( $Md$  - valor central da distribuição) e a moda ( $Mo$  - valor mais frequente da distribuição) [Morettin e Bussab, 2010]. A Figura 2.8 apresenta as três distribuições possíveis da assimetria: assimetria negativa, simetria e assimetria positiva. Na assimetria negativa (gráfico A) existe uma concentração de valores acima da média, pois a moda e a mediana são maiores que a média. Já uma curva simétrica (gráfico B) apresenta uma exata repartição de valores em torno da média, visto que o valor mais frequente e o valor central da distribuição são iguais a média. E por fim, na assimetria positiva (gráfico C) existe uma maior concentração de valores à esquerda, abaixo da média [Mattos et al., 2017]. Desta maneira, quanto maior a frequência de valores em torno de um estado crítico (maior ou menor que o estado estável, isto é, a média), mais acentuada será a assimetria da distribuição, podendo ser negativa ou positiva (ilustrados nos gráficos A e B da Figura 2.9, respectivamente). Sendo esse o comportamento esperado na curva do indicador da assimetria para a predição de evento crítico. A Equação 2.4 [Dakos et al., 2012] apresenta a fórmula da assimetria, onde  $1\gamma$  é a assimetria,  $\mu$  é média,  $z$  é o valor do conjunto de dados analisado e  $n$  é o número de valores do conjunto de dados.

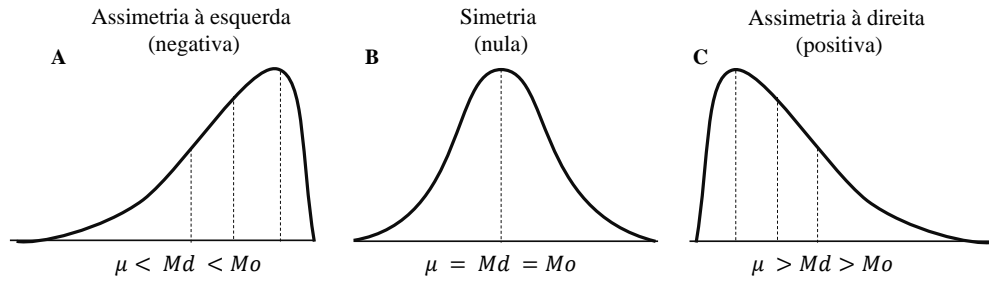


Figura 2.8: Tipos de assimetria: curva simétrica (gráfico **B**), que representa a distribuição normal; curva assimétrica negativa (gráfico **A**); e curva assimétrica positiva (gráfico **C**) [Mattos et al., 2017].

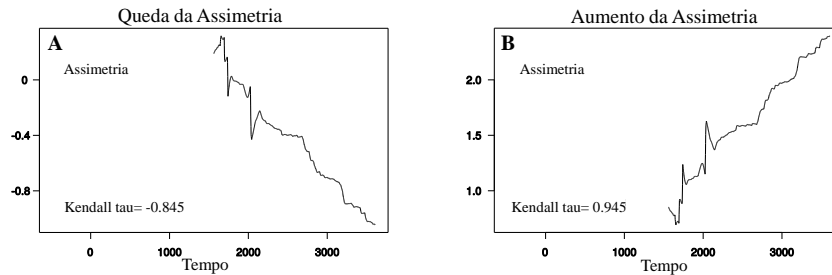


Figura 2.9: Comportamento esperado da curva da assimetria para indicação da iminência de evento crítico: queda ou aumento da assimetria (gráficos **A** e **B**, respectivamente) [Dakos et al., 2012].

$$1\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^3}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^2}} \quad (2.4)$$

Fortes perturbações impulsionam o estado de saúde do paciente alcançar valores extremos, como valores consideravelmente altos de frequência cardíaca, que são raros de aparecer. A presença de valores raros nos estados de saúde desestabiliza o paciente, e causa um aumento na medida da **curtose**. A curtose se refere ao achatamento da curva da distribuição em relação a distribuição normal (gráfico A da Figura 2.10), sendo que quanto maior o achatamento (gráfico B da Figura 2.10), maior a dispersão dos valores da distribuição [Mattos et al., 2017]. Para predição de evento crítico, a curtose tende a se tornar leptocúrtica, isto é, ela apresenta um aumento na cauda da distribuição das observações. Esse comportamento indica que há a presença de valores raros nas observações dos estados, com grande dispersão, e que o estado de saúde do paciente alcançou valores críticos, sinalizando indícios de evento crítico próximo. Por consequência, o indicador estatístico da curtose tende a apresentar uma curva elevada no histórico das observações, ilustrado no gráfico C da Figura 2.10. Estatisticamente, a curtose é o quarto momento padronizado em torno da média de uma distribuição estimada conforme Equação 2.5 retirada de [Dakos et al., 2012], onde  $\kappa$  é a curtose,  $n$  é o número de valores do conjunto de dados,  $\mu$  é a média da distribuição e  $z$  o valor do conjunto de dados observado.

$$\kappa = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^2}\right)^2} \quad (2.5)$$

Esse conjunto de indicadores apresenta um comportamento específico quando o estado de saúde do paciente se encontra próximo a uma transição crítica, sendo um aumento

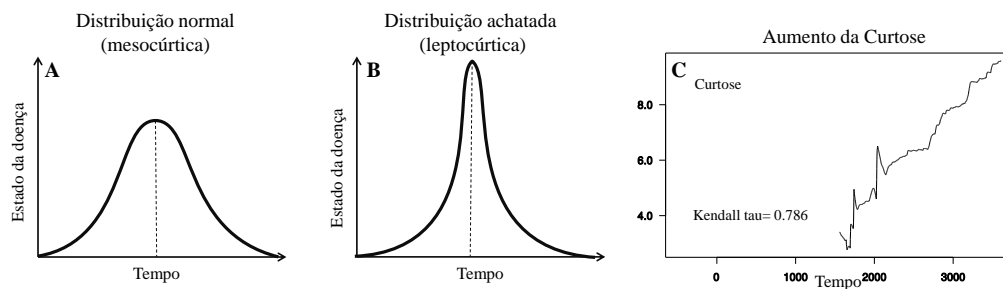


Figura 2.10: Indicador estatístico: curtose. Os gráficos **A** e **B** demonstram exemplos de curtose mesocúrtica e leptocúrtica, respectivamente [Mattos et al., 2017]. O gráfico **C** apresenta o comportamento esperado da curva da curtose para a predição de evento crítico.

na autocorrelação, variância, assimetria e curtose, enquanto mostra uma queda na taxa de retorno [Dakos et al., 2012]. Esse conjunto de comportamentos para os indicadores acima aponta a proximidade das fronteiras críticas, e, por consequência, a possibilidade do estado do paciente alterar para um estado crítico (como para o estado de depressão). Dessa maneira, permite prever a tendência de ocorrer eventos críticos em doenças humanas, representando assim um grande avanço para o diagnóstico médico.

## 2.5 Resumo

Este capítulo apresentou os conceitos importantes sobre as características das redes 802.15.6, como sua topologia e dispositivos. Descreveu também os requisitos necessários de QoS das WBANs, como tratamento especial dos alertas médicos. Esse tratamento requer identificação imediata de eventos graves na saúde dos pacientes, como ataques cardíacos, para emissão dos alertas e priorização do acesso ao meio para o envio urgente dos mesmos aos profissionais da saúde. Além disso, como as WBANs empregam outras tecnologias e redes sem fio para transmissão das mensagens emergenciais até os centros de saúde, esse capítulo detalhou as redes 802.11 que podem ser utilizadas nessa transmissão. Para isso, foram descritas as topologias e características das WLANs, juntamente com seu mecanismo de acesso ao meio e categorias de acesso. Essas categorias classificam os diferentes tipos de tráfegos das WLANs, a fim de favorecer o tráfego prioritário no acesso ao meio. E por fim, na seção 2.4.1 foi apresentado os métodos para predição de eventos críticos em doenças humanas, a fim de compreender o embasamento estatístico nessa previsão e seu conjunto de indicadores genéricos. Todos esses conceitos auxiliam na compreensão do sistema proposto e suas etapas apresentados no capítulo 4.

## Capítulo 3

# Revisão Bibliográfica

Este capítulo revisa a literatura acerca dos métodos de identificação e transmissão de alertas médicos nas redes corporais sem fio. Além disso, ele descreve trabalhos recentes sobre a predição da tendência de eventos críticos em doenças humanas. Para isso, a Seção 3.1 detalha os trabalhos que identificam, priorizam e transmitem os alertas médicos das WBANs, sendo que apenas dois desses trabalhos consideram o contexto WBAN e WLAN na transmissão. Em seguida, a Seção 3.2 apresenta os principais trabalhos sobre predição da tendência de eventos críticos relacionados à saúde humana.

### 3.1 Identificação e Transmissão de Alertas Médicos

A análise de dados coletados por sensores auxilia na geração de alertas médicos sobre eventos que venham a ameaçar a vida dos pacientes, tais como ataques cardíacos (i.e., eventos críticos) [Cavallari et al., 2014]. No entanto, esses eventos críticos são identificados quando já estão em progresso. Por sua natureza emergencial, os alertas médicos requerem transmissão imediata para os profissionais da saúde, aceitando no máximo 125 ms de latência (latência definida pelas normas da WBAN como adequada à tomada de ações dos médicos em tempo de salvar vidas) [Association et al., 2012]. Nesse sentido, alguns estudos propõem formas de identificar eventos críticos e gerar alertas médicos, além de classificá-los em níveis de prioridade [Misra e Sarkar, 2015, Kim e Kim, 2015, Kathuria e Gambhir, 2016]. Outros estudos propõem mecanismos para a transmissão imediata dos alertas [Gündoğdu e Çalhan, 2016, Bhandari e Moh, 2016]. E poucos trabalhos consideram a integração WBAN e WLAN e seus fluxos de dados na transmissão [Rashwand e Misic, 2015, Bradai et al., 2016].

Os trabalhos [Misra e Sarkar, 2015, Kim e Kim, 2015, Kathuria e Gambhir, 2016] propuseram métodos para identificação de eventos críticos e classificação prioritária para transmissão dos alertas médicos. Em [Misra e Sarkar, 2015], os autores classificam os pacotes de dados conforme o seu índice de prioridade, o qual foi criado segundo as características do paciente, como idade, sexo e doença. No estudo de [Kim e Kim, 2015], os níveis de prioridades são associados ao tipo do sensor utilizado. Para isso, os autores consideraram apenas os sensores ECG (frequência cardíaca), EEG (atividade cerebral) e EMG (atividade muscular), do nível mais alto para o mais baixo de prioridade. A solução proposta em [Kathuria e Gambhir, 2016] utiliza os algoritmos de aprendizagem de máquina *Support Vector Machine* e *Binary Decision Tree* para classificar os pacotes com base nos atributos dos seus cabeçalhos, como tipo de tráfego e índice de alerta. Esse índice é definido segundo limiares do sinal vital recebido. Apesar de todos esses estudos apresentarem atrasos menores que 1 segundo na transmissão dos alertas, eles identificam os eventos críticos quando estes já estão em progresso e apenas consideram limiares específicos

de sinais vitais para realizar a identificação. Além disso, as propostas ignoram os outros fluxos de dados, como voz e vídeo, que compartilham o uso do meio de transmissão até o destino final.

A fim de transmitir imediatamente os dados emergenciais sobre a saúde dos pacientes, os estudos de [Gündoğdu e Çalhan, 2016, Bhandari e Moh, 2016] propõem mecanismos de transmissão prioritária. O trabalho de [Gündoğdu e Çalhan, 2016] propõe o uso de filas não preemptivas, ou seja, uma vez que a transmissão dos dados começou ela não pode ser interrompida, no coordenador da WBAN (i.e., dispositivo móvel do paciente). Essa transmissão emprega três níveis de prioridade: dados emergenciais (ECG), sob demanda (requisições específicas de sinais) e normal (sinais periódicos). Eles obtiveram atraso de 0,5 segundos para tráfego emergencial até o ponto de acesso, levando em conta apenas 3 sensores. Em [Bhandari e Moh, 2016], os autores classificam os diferentes fluxos de tráfegos nas categorias emergencial (alertas médicos), sob demanda (sinais contínuos, como ECG, EEG e EMG), normal (sinais não contínuos, como temperatura) e tráfego não médico (áudio, vídeo, dados). Na transmissão prioritária, os autores dividem a fase de alocação de canal da WBAN em subfases exclusivas para cada prioridade, permitindo apenas que o tráfego emergencial utilize todas as subfases durante sua transmissão. Apesar de ambos os trabalhos alcançarem latências menores que 1 segundo na transmissão dos dados emergenciais, a identificação do evento crítico ocorre pela comparação de limiares particulares dos sinais vitais para tomada de decisões. Por consequência, necessita de conhecimentos específicos dos sinais. Além do mais, esses trabalhos não consideram a integração das WBANs com outras redes sem fio na transmissão dos dados até os centros de saúde.

Com o intuito de solucionar o desafio de mapeamento prioritário da WBAN dentro das categorias de acesso da WLAN, os trabalhos [Bradai et al., 2015, Rashwand e Mistic, 2015] propõem mecanismos para mapear as oito prioridades da WBAN definidas pelo TG6 da IEEE em quatro categorias de acesso das redes 802.11. O estudo de [Rashwand e Mistic, 2015] mapeia os dois maiores níveis de prioridade da WBAN, que englobam alertas médicos e dados de controle da rede, em um nível mais alto da categoria de acesso da WLAN (referente a dados de voz). Em [Bradai et al., 2016], os autores definem três categorias prioritárias de tráfego WBAN: emergencial, sob demanda e normal. Na sequência, os autores agregam os oito níveis de prioridades nessas categorias conforme similaridades, sendo que a categoria emergencial recebe prioridade de dados de voz. Ambos os trabalhos apresentam latências menores que um segundo, porém não tratam a identificação de eventos críticos na saúde dos pacientes.

A Tabela 3.1 apresenta a comparação dos trabalhos relacionados. Ela mostra um resumo dos requisitos considerados importantes para identificação e transmissão imediata dos alertas médicos para os profissionais da saúde e centros hospitalares. O requisito de identificação corresponde à forma que os alertas médicos são identificados, como por exemplo, se empregam limiares particulares dos sinais vitais ou alguma medida estatística. A priorização diz respeito ao mapeamento dos níveis de prioridade considerando os diferentes tipos de dados presentes nas WBANs, onde os alertas requerem o nível mais alto de prioridade. A transmissão se refere ao encaminhamento prioritário dos alertas médicos aos profissionais da saúde, considerando técnicas que priorizem o acesso ao meio para o envio dos alertas. E por fim, a coluna nomeada redes híbridas corresponde a integração das redes WBANs com outras redes sem fio, como WLANs, para transmissão dos alertas até o destino final. A última linha da tabela, solução proposta, apresenta que a proposta desta dissertação considera os quatro requisitos, englobando a identificação e transmissão prioritária no contexto híbrido WBAN/WLAN.

Com base na revisão bibliográfica realizada, no geral, a identificação dos eventos críticos delimita-se à comparação de limiares predefinidos para sinais vitais específicos. Além disso, a maioria dos trabalhos ignora os outros fluxos de dados presentes nas redes sem fio. Sendo poucos os trabalhos que consideram a integração WBAN e WLAN e seus fluxos de dados. Em suma,

Tabela 3.1: Propriedades dos trabalhos da literatura

Trabalho	Identificação	Priorização	Transmissão	Redes Híbridas
[Misra e Sarkar, 2015]	Sim	Sim	Sim	Não
[Kim e Kim, 2015]	Sim	Sim	Sim	Não
[Kathuria e Gambhir, 2016]	Sim	Sim	Sim	Não
[Gündoğdu e Çalhan, 2016]	Não	Sim	Sim	Não
[Bhandari e Moh, 2016]	Não	Sim	Sim	Não
[Bradai et al., 2015]	Não	Sim	Sim	Sim
[Rashwand e Mistic, 2015]	Não	Sim	Sim	Sim
Solução proposta	Sim	Sim	Sim	Sim

esses estudos ora se preocupam em identificar eventos críticos, ora em transmitir prioritariamente os alertas médicos gerados. Sendo, no melhor do nosso conhecimento, inexistentes estudos que realizam tanto a identificação quanto a transmissão prioritária dos alertas médicos no contexto híbrido WBAN/WLAN.

## 3.2 Indicadores Genéricos na Previsão de Eventos Críticos

Os estudos sobre a predição de eventos críticos começaram em sistemas ecológicos, como clima e vegetação, seguindo para sistemas financeiro [Kéfi et al., 2007, Scheffer et al., 2009]. Nesses estudos, os pesquisadores preveem tendências de ocorrer, por exemplo, uma desertificação do solo, tsunami ou uma queda de mercado. Nesse contexto, recentes estudos empregaram essa previsão de eventos críticos no âmbito das doenças humanas, a fim de prever doenças crônicas, depressão, exacerbações, entre outras [Scheffer et al., 2013, van de Leemput et al., 2014, Rikkert et al., 2016]. Tanto o clima e o mercado financeiro quanto as doenças humanas compreendem sistemas que inesperadamente apresentam mudanças críticas (também conhecidas por transições críticas) devido a eventos críticos. Por exemplo, nas doenças humanas acontecem ataques espontâneos, como ataques de asma e crises epiléticas. A predição da tendência desses eventos pode auxiliar na tomada de medidas pelos profissionais da saúde, e com isso, prevenir ou até mesmo evitar a ocorrência de eventos mais graves na saúde do paciente.

O estudo de [Scheffer et al., 2013] discute a existência de transições críticas em ataques graves de enxaqueca. Essas enxaquecas se caracterizam por fortes dores de cabeça que pioram com a movimentação. A origem dos ataques de enxaqueca está na propagação da despolarização, isto é, uma atividade disparada de propagação no cérebro que gasta muita energia e demanda de muito fluxo sanguíneo. Como os neurônios precisam de sangue, a atividade cerebral para em alguns pontos, podendo causar uma aura visual. Os sintomas da aura, como *flashes* de luz e manchas escuras, aparecem antes de ocorrer a enxaqueca, o que serve como um alerta para o paciente. Nesse sentido, os autores propõem que a transição crítica para a enxaqueca compreende essa propagação da despolarização, que pode causar aura visual e graves ataques de enxaqueca. Como prova, aplicaram o modelo matemático e a teoria dos indicadores genéricos na discussão. Porém, eles não aplicaram nenhuma medida estatística do conjunto de indicadores genéricos para previsão de ataques de enxaqueca. Apenas comprovaram que os sintomas de enxaqueca se enquadram dentro da teoria dos indicadores, mostrando que pode ser possível sua aplicação.

Aproximadamente 10 a 20% da população mundial passa por episódios de depressão em algum momento de sua vida. Devido a isso, [van de Leemput et al., 2014] comprovam a existência de transições críticas em sintomas de depressão e aplicam os indicadores genéricos

para prever a ocorrência da doença. Para este fim, relacionaram a doença com o fenômeno *Critical Slowing Down* (CSD). Este fenômeno consiste no tempo levado para recuperação ao estado de estabilidade na saúde do paciente após perturbações. Além disso, os autores analisaram que uma pessoa se torna depressiva devido a sentimentos e experiências, como por exemplo, o estresse causa emoções negativas, essas emoções geram insônia, e a insônia causa perda de prazer pela vida. Com isso, existe uma troca de influência entre os sintomas das perturbações. Após as perturbações, o estado de saúde do paciente perde sua resiliência, assim pequenas perturbações são suficientes para causar uma transição crítica. Desse modo, uma pequena perturbação pode desencadear uma cadeia de sintomas que impulsiona o estado da saúde à depressão. Por fim, os autores estimaram a autocorrelação, variância e correlação entre as emoções, cujos quais compreendem os indicadores utilizados para estimar o CSD.

A medicina relacionada aos cuidados com a saúde requer um melhor entendimento sobre as transições críticas existentes nas doenças crônicas. Nesse sentido, o trabalho de [Rikkert et al., 2016] propõe um estudo sobre a previsão de ataques agudos e exacerbações em distúrbios crônicos, como asma, arritmia cardíaca, enxaqueca, epilepsia e depressão. Uma constatação comum com os estados das doenças acima mencionados consiste que o risco de transições críticas está associado à lentidão na recuperação da estabilidade após perturbações. Em função disso, o estudo se baseou no fenômeno CSD, empregando a lentidão na recuperação como um sinal de alerta. Para estimação do CSD utilizaram os indicadores genéricos da variância e autocorrelação. E ainda, estimaram a correlação entre sinais fisiológicos, como pressão do sangue e frequência respiratória. Os resultados obtidos apresentaram o conjunto de tendência necessário para previsão de eventos críticos. Esse estudo, além de mostrar a possibilidade de aplicar os indicadores em doenças crônicas, mostrou que os indicadores podem auxiliar na compreensão das causas dessas doenças.

Esses estudos recentes feitos sobre a previsão da tendência de ocorrer eventos críticos em doenças humanas são apenas estudos iniciais [Rikkert et al., 2016]. Eles confirmam a possibilidade de aplicação dos indicadores genéricos em doenças humanas, abrindo novas oportunidades para o tratamento médico. Dessa forma, o uso desses indicadores para previsão de doenças cardiovasculares, ataques repentinos, asma, entre outras doenças graves, representa um grande avanço para a medicina. No entanto, requerem mais estudos que apliquem os indicadores genéricos em dados vitais reais, a fim de analisar seu comportamento estatístico. Com base nisso, o objetivo dessa dissertação compreende a identificação antecipada de eventos críticos na saúde de pacientes e a transmissão prioritária de alertas médicos sobre os eventos. Sendo que a identificação dos eventos críticos aplica o conjunto de indicadores genéricos sobre dados reais de frequência respiratória. Para cada evento identificado, alertas médicos são emitidos e transmitidos prioritariamente para os profissionais da saúde no contexto WBAN/WLAN.

### 3.3 Resumo

Este capítulo apresentou os métodos e as soluções existentes na literatura para a identificação e a transmissão de alertas médicos das WBANs. Alguns desses trabalhos identificam e priorizam os alertas médicos, outros identificam e transmitem os alertas, e apenas um trabalho considera outras redes no envio dos alertas para os profissionais da saúde. Além destes trabalhos, foram apresentados estudos recentes que empregam um conjunto de indicadores genéricos para auxiliar na predição da tendência de ocorrer eventos críticos em doenças humanas. Foram detalhados estudos sobre enxaquecas, depressão e doenças crônicas, mostrando seus benefícios para a medicina. O próximo capítulo especifica um sistema de identificação antecipada e

transmissão prioritária de alertas médicos no contexto WBAN e WLAN, que emprega um conjunto de indicadores genéricos na identificação dos alertas.



## Capítulo 4

# SANTE - Sistema Proposto

Este capítulo apresenta o sistema proposto para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos no contexto WBAN/WLAN. Os alertas médicos informam os profissionais da saúde sobre possíveis eventos críticos na saúde dos pacientes, como ataques cardíacos e paradas respiratórias. Para identificação antecipada dos eventos, o sistema considera um conjunto de indicadores genéricos embasados no comportamento de medidas estatísticas analisadas sobre dados fisiológicos. Para transmissão dos alertas, o sistema prioriza o acesso ao meio sem fio através de uma nova categoria de acesso exclusiva para os mesmos nas WLANs. Nesse sentido, a Seção 4.1 apresenta uma visão geral do sistema proposto e seus objetivos. A Seção 4.2 detalha o modelo de rede empregado no sistema. Por seguinte, a Seção 4.3 especifica o sistema e suas etapas. E por fim, a Seção 4.4 descreve o funcionamento geral do sistema, e a Seção 4.5 conclui o capítulo.

### 4.1 Visão Geral

Os objetivos do sistema SANTE (*System for Anticipated Identification and Transmission of Medical Alerts on WBAN/WLAN*) englobam a identificação antecipada de eventos considerados críticos em pacientes e a transmissão prioritária dos alertas médicos. Particularmente, a identificação tem como base mudanças significativas no padrão dos dados coletados dos sinais vitais de pacientes. No sistema SANTE, tanto a identificação, quanto a transmissão tem como objetivo informar os profissionais de saúde o mais rápido possível sobre os eventos críticos identificados e, assim, auxiliar na rápida ação desses profissionais.

No escopo deste trabalho, os eventos críticos compreendem situações que podem resultar em consequências graves na vida dos pacientes, como um ataque cardíaco ou uma parada respiratória. A gravidade de tais eventos demanda ações imediatas dos profissionais da saúde e assim, atrasos podem ter consequências sérias, e até mesmo fatais. Desta forma, a possibilidade de prever a iminência de tais eventos e transmitir imediatamente alertas sobre eles para os centros de saúde beneficiam a monitoração médica, prevenindo exacerbações de doenças.

Para alcançar os objetivos propostos, a arquitetura geral do sistema SANTE é dividida em quatro etapas: *coleta dos dados*, *predição de eventos críticos*, *transmissão prioritária* e *envio ao destino final*. A primeira etapa consiste na coleta dos sinais vitais pelos sensores corporais e o envio dos mesmos para o coordenador da WBAN (i.e., dispositivo móvel do paciente). A segunda etapa consiste na predição da ocorrência de eventos críticos a partir de um conjunto de indicadores estatísticos genéricos, que avaliam o comportamento dos sinais vitais de pacientes. Quando os indicadores apontam a iminência de eventos críticos, o sistema gera um alerta médico. Na terceira etapa, realiza-se a classificação prioritária dos alertas médicos sobre todos os demais

tipos de tráfego da rede por meio da classificação de tráfego existente do padrão IEEE 802.11. No entanto, como o padrão 802.11 não considera o tráfego de alertas médicos, o sistema SANTE adiciona uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos, a fim de transmitir prioritariamente os mesmos via WLAN. Por fim, a quarta etapa encaminha os alertas para o destino final, nesse caso para os médicos e/ou servidor do hospital.

## 4.2 Modelo da Rede

A arquitetura geral das WBANs possui dois níveis de comunicação: a comunicação *intra-body* e *inter-body*. Na comunicação *intra-body* realiza-se a troca de informação entre os sensores e o coordenador da WBAN. Esta comunicação utiliza tecnologias sem fio para curtas distâncias, como ZigBee. A comunicação *inter-body* se refere à troca de informação entre o nó coordenador e o ponto de acesso (AP) de uma rede externa, a fim de encaminhar os dados vitais e alertas médicos para os centros hospitalares. Essa comunicação requer distâncias mais longas, logo se utiliza redes sem fio com maior alcance de transmissão, como as WLANs [Movassaghi et al., 2014]. O sistema SANTE propõe melhorias de priorização de tráfego emergencial na comunicação *inter-body* da WBAN, no sentido de priorizar a transmissão dos alertas médicos e, assim, auxiliar na integração das WBANs com outras redes sem fio, nesse caso com as WLANs. Por isso, o sistema SANTE é aplicado no contexto híbrido WBAN/WLAN.

A fim de encaminhar os alertas médicos até os centros hospitalares, a infraestrutura geral do sistema SANTE considera a arquitetura das redes WBANs e WLANs. Para isso, na WBAN emprega-se pelo menos um sensor e um nó coordenador (i.e., dispositivo móvel do paciente). O nó coordenador se comunica tanto com os sensores, quanto com um AP da WLAN para transmissão dos dados. Na arquitetura da WLAN considera-se o dispositivo móvel do paciente e o AP. Dessa maneira, o dispositivo móvel recebe os dados vitais coletados pelos sensores, emite alertas médicos quando eventos críticos são identificados e encaminha os alertas para o AP. Uma vez no AP, os alertas são enviados para os servidores do centro hospitalar. Para não prejudicar a transmissão prioritária de tais alertas, espera-se que o AP esteja conectado à rede cabeada do hospital e empregue mecanismos de priorização.

Para a comunicação *inter-body*, o padrão IEEE 802.11 serviu de base para o funcionamento das redes WLANs. As especificações de QoS do padrão IEEE 802.11 foram seguidas na camada MAC. Para controle de acesso ao meio, essas redes utilizam a função de controle distribuída (DCF) embasada no protocolo CSMA/CA, o qual segue a abordagem “escute antes de falar”, ou seja, a estação sem fio escuta o meio sem fio antes de transmitir, a fim de evitar colisões [IEEE, 2012]. Além da função DCF, foi considerado o protocolo EDCA que oferece suporte a QoS [IEEE, 2004]. Esse protocolo oferece categorias de acesso ao meio que classificam os diferentes tipos de tráfegos da rede. Assim, cada categoria recebe um valor referente à sua janela de contenção e seu intervalo entre quadro (*Arbitration Inter-Frame Spacing - AIFS*). O intervalo AIFS aumenta ou diminui o tempo de espera para transmissão de cada categoria de acesso. Dessa maneira, as categorias com maiores prioridades, como os alertas médicos, recebem os menores valores em tais parâmetros.

## 4.3 O Sistema SANTE

Para garantir a identificação antecipada de eventos críticos e a transmissão imediata dos alertas médicos sobre as redes WBANs e WLANs, a arquitetura geral do sistema SANTE segue suas quatro etapas ilustradas na Figura 4.1. A *coleta dos dados* compreende a monitoração

contínua, coleta e envio dos dados vitais pelos sensores para o nó coordenador da WBAN (i.e., dispositivo móvel do paciente). Uma vez no nó coordenador, a etapa de *predição de eventos críticos* emprega um conjunto de indicadores estatísticos genéricos sobre os dados vitais a fim de auxiliar na identificação antecipada de possíveis eventos críticos na saúde do paciente. Caso seja identificado um evento, SANTE emite um alerta médico. A *transmissão prioritária* desse alerta médico, a partir do nó coordenador até o ponto de acesso, emprega uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas que recebem o maior nível de prioridade na rede. Essa transmissão utiliza redes 802.11. Uma vez no AP, a etapa de *envio ao destino final* encaminha o alerta para os profissionais da saúde e/ou servidor do centro hospitalar por meio da Internet. Vale ressaltar que as principais contribuições deste trabalho ocorrem em duas etapas: na *predição de eventos críticos* e na *transmissão prioritária*, visto que na primeira etapa realiza-se a predição de eventos críticos na saúde de pacientes e na segunda etapa transmite-se prioritariamente os alertas médicos através da nova categoria de acesso ao meio oferecida pelo SANTE.

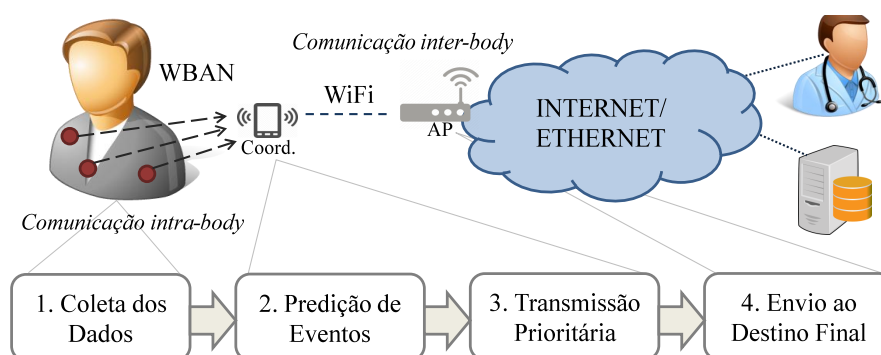


Figura 4.1: Arquitetura geral do SANTE

### 4.3.1 Coleta dos Dados

Nesta etapa, os dados sobre os sinais vitais do paciente são monitorados, coletados e enviados pelos sensores corporais para o coordenador da WBAN. Os sensores se comunicam com o coordenador da WBAN por meio de tecnologias de comunicação de baixo alcance, comumente denominada de comunicação *intra-body*. Conforme ilustra a Figura 4.1, os dados coletados pelos sensores são transmitidos ao coordenador da WBAN. O coordenador então processa os dados e posteriormente transmite os alertas médicos aos centros de saúde.

Nas WBANs, existem diferentes tipos de sensores corporais, onde cada um monitora um respectivo sinal vital [Movassaghi et al., 2014]. Por exemplo, os sensores de eletrocardiograma (ECG) coletam dados sobre os batimentos cardíacos, enquanto os sensores de temperatura monitoram a temperatura do corpo. Dessa maneira, vários sensores atuam ao mesmo tempo no corpo humano e diferentes tipos de dados corporais são coletados. Dentre esses dados, alguns possuem uma maior urgência para entrega aos profissionais de saúde (exemplo ECG), enquanto outros englobam dados periódicos de rotina médica que não possuem tamanha criticidade (exemplo temperatura) [Cavallari et al., 2014]. Em virtude disso, os dados vitais emergenciais com maior criticidade devem ser transmitidos prioritariamente para o coordenador. Caso contrário, pode atrasar a análise dos dados vitais, e, assim, atrasar a identificação antecipada de eventos críticos para a emissão dos alertas médicos.

Nesse sentido, na comunicação *intra-body*, as WBANs devem oferecer suporte à QoS para transmitir imediatamente os dados vitais emergenciais. Para isso, o padrão IEEE 802.15.6 emprega oito níveis de prioridades (detalhados na Seção 2.1 do Capítulo 2) que englobam desde

dados normais de rede, como voz e vídeo, até dados vitais contínuos e emergenciais, como temperatura e ECG [Association et al., 2012]. Para favorecer os dados vitais emergenciais no acesso ao meio, eles recebem o maior nível de prioridade com valor reduzido em sua janela de contenção. Com base nisso, a etapa de *coleta dos dados* do sistema SANTE considera que a WBAN utiliza essas prioridades na transmissão dos dados sobre sinais vitais coletados pelos sensores para o coordenador da rede WBAN. No entanto, apesar do padrão IEEE 802.15.6 ter essa classificação prioritária, ela não é aplicada no padrão IEEE 802.11 para transmissão dos dados vitais do coordenador da WBAN até o destino final (comunicação *inter-body* da WBAN). Por isso, o sistema SANTE, na etapa da *transmissão prioritária*, propõe a criação de uma nova categoria de acesso ao meio, particular aos alertas médicos, no padrão 802.11. Assim, com o uso de priorização, na próxima etapa do sistema SANTE, o coordenador será capaz de identificar eventos críticos e emitir alertas médicos a tempo de reportar os médicos. De fato, os alertas podem informar aos médicos sobre eventos críticos que venham ameaçar a vida dos pacientes. Quanto antes as tendências desses eventos sejam identificadas e transmitidas ao centro médico, as chances de sobrevivência dos pacientes aumentam.

### 4.3.2 Predição de Eventos Críticos

Esta etapa ocorre no coordenador da WBAN, onde os dados sobre sinais vitais coletados são analisados para apontar tendências sobre a iminência de situações emergenciais na saúde de pacientes e gerar alertas médicos. No geral, as propostas anteriores realizam a identificação de eventos críticos na saúde do paciente por meio de limiares particulares dos sinais vitais [Kathuria e Gambhir, 2016]. Neste caso, os nós coordenadores da WBAN empregam limiares específicos para cada parâmetro fisiológico monitorado, identificando os eventos quando estes já estão em progresso. As pesquisas médicas apontam que a detecção e o tratamento de doenças em seus estágios iniciais previnem exacerbações [Health Organization, 2015]. Entretanto, a possibilidade de prever ataques agudos permite prevenir ou até mesmo tomar medidas para evitar a ocorrência de eventos mais graves na saúde do paciente. Em vista disso, o sistema SANTE emprega no coordenador da WBAN um conjunto de indicadores genéricos (detalhados na Seção 2.4 do Capítulo 2) embasados em medidas estatísticas que identificam tendências sobre a iminência de eventos críticos, sem requerer um conhecimento específico de cada sinal vital.

O conjunto de indicadores estatísticos genéricos foi fundamentado em resultados de pesquisas científicas realizadas nos últimos anos sobre a predição de mudanças graves (também chamadas de transições críticas) [Dakos et al., 2012]. As doenças crônicas e depressão apresentam as transições críticas com episódios de ataques sem sintomas prévios aparentes, tais como arritmia cardíaca, ataques epiléticos, desordem bipolar e enxaqueca [Rikkert et al., 2016]. As transições críticas se caracterizam por uma alteração brusca e repentina de um estado para o outro. Elas forçam o estado da doença (conjunto de valores, como a frequência dos batimentos cardíacos ou frequência respiratória) ultrapassar de forma repentina limites críticos, sendo interpretados como mudanças abruptas no estado da saúde do paciente [Scheffer et al., 2009].

Neste trabalho, no coordenador da WBAN, o sistema SANTE toma como base esses indicadores para avaliar as situações na saúde dos pacientes tendo como entrada dados vitais coletados pelos sensores corporais da WBAN, como dados de frequência respiratória, temperatura e batimentos cardíacos. Esses indicadores apontam um evento crítico na saúde quando um conjunto de tendências específicas são encontradas nas curvas resultantes de um curto histórico desses indicadores [Dakos et al., 2012]. Quando tais tendências de um evento crítico são identificadas, o sistema proposto gera um alerta médico, i.e., um pacote com prioridade de acesso

ao meio. Este alerta precisa ser enviado a centros médicos a fim de precaver os profissionais sobre a possível necessidade de atendimento emergencial ao paciente.

Particularmente, os indicadores estatísticos utilizados conjuntamente neste trabalho consistem em: taxa de retorno, autocorrelação, variância, assimetria e curtose. A **taxa de retorno** representa o tempo levado durante a recuperação do estado de saúde do paciente após perturbações, tais como ingestão de medicamentos, movimentos do corpo e pressão sanguínea baixa. O tempo de recuperação aumenta conforme a situação crítica se aproxima. Assim, uma taxa de retorno lenta indica uma possível direção a um evento crítico. Um aumento na **autocorrelação**, com curta defasagem no tempo (segundos ou minutos), é esperado nas observações na iminência de um evento crítico. A autocorrelação tende a aumentar conforme o estado da doença se aproxima gradualmente das fronteiras críticas, indicando que o estado do paciente se tornou mais similar entre as observações consecutivas [Dakos et al., 2012].

O retorno lento à estabilidade próximo a uma transição crítica faz com que os estados do paciente (ex.: os valores de batimentos cardíacos) alterem amplamente em torno do estado estável, causando um aumento na **variância** das observações. Além disso, a presença de valores distantes do estado estável provoca também um aumento na **assimetria** da curva da distribuição das observações. Por consequência, o estado da saúde tende a permanecer em torno de um estado crítico. Note que a assimetria pode aumentar ou diminuir dependendo se a transição crítica do estado do paciente tende para um estado maior ou menor em relação ao estado atual. O aumento da variância e a acentuação da assimetria indicam que há uma dispersão dos valores do estado do paciente, isto é, valores longe da estabilidade. A grande dispersão dos valores causa um aumento da **curtose**. A curtose apresenta um achatamento na cauda da distribuição das observações, indicando que há a presença de valores raros nos estados e que o estado do paciente alcançou valores extremos. Esse comportamento aponta um possível evento crítico se aproximando.

Esses indicadores apresentam um conjunto de tendências específicas em seus comportamentos quando o estado do paciente se encontra próximo a uma transição crítica. Essas tendências englobam um aumento nas medidas de autocorrelação, variância, assimetria e curtose, enquanto mostra uma queda na taxa de retorno [Dakos et al., 2012]. Esse conjunto de comportamentos para os indicadores acima aponta a proximidade das fronteiras críticas, e por consequência, a possibilidade do estado do paciente alterar para um estado crítico. Devido a isso, a identificação antecipada dos eventos críticos sobre sinais fisiológicos se embasou nesse conjunto de comportamentos. Em suma, quando esse conjunto de comportamentos é identificado, gera-se um alerta médico (ilustrado na Figura 4.2).

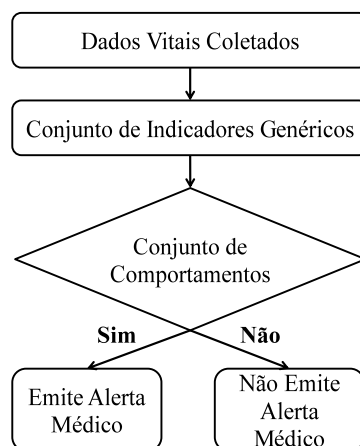


Figura 4.2: Funcionamento da etapa *predição de eventos críticos* do SANTE

A Figura 4.2 apresenta o funcionamento geral da etapa de *predição de eventos críticos* do sistema SANTE. Nesta etapa, os dados de entrada compreendem dados coletados pelos sensores corporais. A fim de observar o comportamento desses dados, o sistema SANTE aplica o conjunto de indicadores genéricos estatísticos. Quando esses indicadores apresentam um conjunto de comportamento com tendências específicas que apontam um possível evento crítico, o sistema emite um alerta médico. Como esse alerta procura informar os profissionais da saúde sobre situações emergenciais da vida do paciente, ele requer transmissão imediata aceitando no máximo 125 ms de latência (conforme normas do TG6 da WBAN [Association et al., 2012]), para ação rápida desses profissionais em tempo de salvar vidas.

### 4.3.3 Transmissão Prioritária dos Alertas Médicos

Uma vez identificado o evento crítico no coordenador da WBAN, um alerta médico é emitido para o centro de saúde, a fim de que os procedimentos médicos sejam instaurados. Por ser crítico, este alerta deve ser transmitido de forma prioritária, sofrendo o mínimo de interferência e atraso. Contudo, prover este requisito de qualidade (mínima interferência e atraso) na comunicação *inter-body* (entre o coordenador WBAN e o seu ponto de acesso) pode ser desafiador. As redes locais sem fio baseadas no padrão 802.11 têm apresentado desempenho insatisfatório à medida que a quantidade de usuários aumenta [Divgi e Chlebus, 2013]. Mesmo assim, há uma ampla prevalência deste padrão nas WLANs, incluindo hospitais e clínicas em que o coordenador WBAN obtém o seu acesso através de uma ponte entre estas redes. Nos últimos anos, o crescimento observado na quantidade de dispositivos tem resultado na sobrecarga das WLANs, principalmente aquelas operando nas faixas livres em frequência de 2,4GHz e instaladas sem planejamento. Assim, falhas decorrentes desta sobrecarga nas WLANs podem resultar na perda dos alertas médicos.

As propostas anteriores efetuam um mapeamento entre as prioridades de uso das WBANs e as categorias de acesso das WLANs [Rashwand e Misic, 2015, Bradai et al., 2016]. Neste caso, o tráfego de notificação de evento emergencial é mapeado para a categoria de acesso de voz da rede local. Com base nisto, o coordenador faz a ponte e envia os alertas médicos urgentes com o mesmo nível de priorização de uma chamada telefônica ou outro tipo de aplicação de áudio, que é o tráfego mais crítico no ambiente da WLAN. Contudo, por sua natureza, os alertas médicos deveriam ter prerrogativa sobre todos os demais, uma vez que envolvem a vida dos pacientes. Mesmo com prioridade alta, equivalente a de áudio, as abordagens tradicionais podem gerar disputa de recursos e assim, prejudicar o tráfego de alertas médicos.

Desta forma, o sistema SANTE propõe uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos com base em [Silva et al., 2016]. O estudo de [Silva et al., 2016] reduz a duração dos *slots* da janela de contenção para aumentar a quantidade de intervalos da janela inicial, e com isso, aumentar as possibilidades de sorteio no *backoff* para acesso ao meio. Sendo que, as categorias de acesso prioritárias também são ajustadas conforme regras para definição do tamanho de suas janelas de contenção. Assim, com base no estudo de [Silva et al., 2016] a nova categoria criada em SANTE para os alertas médicos conta com um intervalo arbitrário entre quadros (AIFS) menor do que o empregado para categoria de voz. Além disso, a janela de contenção é reduzida a um único *slot*. Com isto, as transmissões de alertas do coordenador WBAN passam a ter prioridade sobre todos os demais tipos de tráfego. A Figura 4.3 ilustra a categoria de acesso para o alerta médico em relação às demais categorias.

O uso de um intervalo AIFS tão pequeno, praticamente sem contenção, pode ser um problema se houver um congestionamento de alertas. Todavia, alguns ajustes são feitos para evitar que isto ocorra ou que gere um impasse ou bloqueio do mecanismo. Primeiro, limita-se

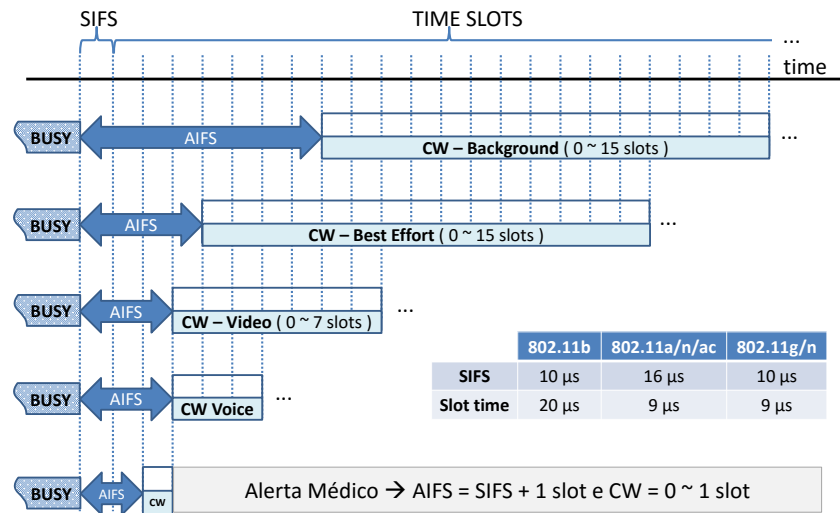


Figura 4.3: As transmissões iniciam dentro da janela de contenção (CW)

o tamanho dos quadros de alertas críticos em 50 bytes, minimizando o impacto de colisões, pois quadros menores ocupam menos o canal e assim, caso ocorra uma colisão, o desperdício é minimizado. Segundo, controla-se o fluxo dos alertas dos dispositivos móveis, evitando rajadas que enfileiram os quadros na camada MAC, promovendo uma melhor distribuição desses fluxos. Terceiro, a transmissão dos alertas é interrompida tão logo sejam recebidos pelo sistema do centro médico, evitando retransmissões desnecessárias. Por último, emitem-se alertas nesta categoria apenas para eventos críticos. Com estes cuidados, garante-se uma via quase exclusiva para os alertas médicos em seu caminho entre o coordenador WBAN e o ponto de acesso da WLAN. Uma vez no ponto de acesso, a transmissão do alerta pode contar com redes cabeadas onde podem ser aplicadas reservas de banda ou melhores técnicas de priorização.

#### 4.3.4 Envio ao Destino Final

Esta etapa compreende a transmissão dos alertas médicos do ponto de acesso da WLAN até os profissionais da saúde ou servidor do hospital. Essa transmissão emprega uma rede cabeada ponto a ponto do próprio hospital. No geral, redes cabeadas locais costumam contar com diferentes tipos de serviços, dependendo do ambiente de atuação [Tanenbaum, 2003]. Por exemplo, em redes locais de empresas os tráfegos de vídeo utilizados em reuniões e conferências possuem maior prioridade sobre o tráfego *web* ou de correio eletrônico. Para isso, as redes locais possuem técnicas de diferenciação de serviço, como *DiffService* e LLQ (*Low Latency Queuing*), que priorizam dados com maior urgência. Nessas técnicas pacotes com o mesmo rótulo e tipo de serviço recebem o mesmo tipo de tratamento, favorecendo assim os pacotes prioritários no acesso ao meio [Cisco, 2006].

Os alertas médicos vindos das WBANs compreendem tráfegos emergenciais, uma vez que eles envolvem a vida do paciente. Devido a isso, esses alertas requerem tratamento especial que empregue técnicas de priorização na rede local do hospital para seu encaminhamento aos profissionais da saúde. Desta forma, os pacotes de alertas médicos devem receber o maior nível de prioridade para transmissão, a fim de garantir a latência máxima suportada pelas aplicações médicas. Ressaltando que as aplicações médicas críticas aceitam no máximo 125 ms de latência [Association et al., 2012]. Para tanto, espera-se que o centro de saúde ofereça suporte adequado para o tratamento de alertas médicos das WBANs, como técnicas de *DiffService*, de

forma que não comprometa o diagnóstico e o monitoramento médico, e ainda, o funcionamento das outras etapas do SANTE.

## 4.4 Funcionamento Geral do SANTE

A implementação do sistema SANTE requer dados sobre sinais vitais de pacientes. Esses dados são coletados na primeira etapa do sistema, chamada de *coleta dos dados*, pelos sensores corporais das WBANs. Ainda nessa etapa, os sensores enviam os dados para o coordenador da WBAN comumente representado pelo dispositivo móvel do paciente. Uma vez no coordenador, SANTE executa a etapa de *predição de eventos críticos*, a qual emprega um conjunto de indicadores genéricos sobre os dados fisiológicos para analisar seu comportamento estatístico. Esses indicadores genéricos preveem tendências da iminência de eventos críticos, como ataques cardíacos, através de um conjunto de medidas estatísticas. Entre essas medidas estão autocorrelação, variância e assimetria, que tendem a apresentar um conjunto de comportamento específico à medida que um evento crítico se aproxima do estado de saúde do paciente. Quando os indicadores genéricos identificam um evento crítico, o sistema SANTE emite um alerta médico a fim de informar os profissionais da saúde.

Esse alerta médico requer transmissão imediata para os centros de saúde, visto que carregam informações emergenciais. Nesse sentido, a etapa de *transmissão prioritária* do sistema SANTE propõe uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos, representado o tipo de tráfego com maior prioridade na rede WLAN. Essa nova categoria possui janela de contenção com apenas um *slot* de tempo e conta com um intervalo arbitrário entre quadros (AIFS). Com isso, são favorecidos os alertas no acesso ao meio para sua transmissão a partir do coordenador WBAN até o ponto de acesso da WLAN. Em um cenário WBAN, o AP geralmente está posicionado no hospital e possui conexão com a Internet e rede local do centro hospitalar. Por isso, na etapa *envio ao destino final* o sistema SANTE utiliza a rede cabeada local do hospital para transmitir o alerta médico do AP até o servidor do hospital. Espera-se que o centro de saúde conte com serviços de priorização de tráfegos, como *DiffService*, para favorecimento dos alertas médicos no acesso ao meio da rede cabeada, para não causar atrasos em sua transmissão e prejudicar o diagnóstico médico.

## 4.5 Resumo

Este capítulo apresentou o sistema SANTE, um sistema para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos sobre WBANs e WLANs. Esse sistema auxilia na identificação de tendências sobre a iminência de eventos críticos na saúde dos pacientes por meio de um conjunto genérico de indicadores estatísticos. Uma vez identificados os eventos, como ataques cardíacos, o sistema SANTE emite alertas médicos que requerem transmissão imediata para os centros hospitalares. O sistema adiciona uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos, a fim de priorizar a sua transmissão. Dessa forma, o sistema SANTE além de identificar antecipadamente eventos críticos na saúde dos pacientes, transmite prioritariamente os alertas médicos para informar os profissionais da saúde sobre situações emergenciais que requerem ações imediatas.



## Capítulo 5

# Avaliação do Sistema SANTE

Este capítulo apresenta a avaliação de desempenho do sistema SANTE, visando analisar sua proposta de identificação antecipada de eventos críticos na saúde do paciente e sua transmissão prioritária de alertas médicos sobre redes WBANs e WLANs. Para tal fim, um conjunto de análises estatísticas sobre um conjunto de indicadores genéricos e experimentos de simulação em ambientes de redes foi realizado. A Seção 5.1 descreve o ambiente de análise e simulação, detalhando os traços reais, cenários, parâmetros e métricas utilizados na avaliação dos experimentos. Já a Seção 5.2 apresenta e discute os resultados observados nas análises estatísticas e experimentos de simulação.

### 5.1 Metodologia

O sistema SANTE engloba a identificação antecipada de eventos críticos na saúde dos pacientes e a transmissão prioritária de alertas médicos nas redes WBANs e WLANs. Em vista disso, inicialmente, foi aplicado um conjunto de indicadores genéricos estatísticos sobre dados reais de frequência respiratória. Esses dados são de um paciente de 70 anos de idade com edema pulmonar, disponíveis em [Institutes of Health, 2016]. Esses indicadores apresentam um conjunto de comportamento específico à medida que um evento crítico se aproxima do estado de saúde do paciente. Assim, quando o sistema SANTE identifica esse conjunto de comportamento, ele emite um alerta médico a fim de reportar os profissionais da saúde. Em seguida, para transmissão prioritária desse alerta emprega-se uma nova categoria criada para controlar o acesso ao meio. Essa nova categoria possui sua janela de contenção e intervalo AIFS reduzidos, a fim de favorecer os alertas no acesso ao meio da WLAN. Desta forma, o alerta é encaminhado prioritariamente para os médicos e centros hospitalares.

A fim de avaliar as propostas do sistema SANTE, análises estatísticas e experimentos de simulação em ambientes de redes foram desenvolvidos. Para tanto, resultados estatísticos sobre o conjunto de indicadores foram observados e um cenário de rede foi criado. Esse cenário se embasou em um ambiente doméstico, com diversos usuários conectados na rede sem fio, com o intuito de reproduzir o comportamento de um cenário denso. Por isso, o cenário considera diversas densidades de redes, partindo de 5 a 35 estações no canal sem fio.

#### 5.1.1 Ambiente de Avaliação

O sistema SANTE proposto neste trabalho foi reproduzido e avaliado através da ferramenta de análises estatísticas R [R Foundation, 2016] e por meio do simulador de redes NS-3 [NS-3 Consortium, 2015]. Foi necessário o uso de ambas as ferramentas devido aos

métodos empregados no desenvolvimento das propostas usadas no SANTE, onde a identificação de eventos críticos requer um ambiente estatístico para aplicação do conjunto de indicadores genéricos e a transmissão prioritária precisa de um ambiente de redes para reprodução e avaliação. As duas ferramentas foram escolhidas pela ampla utilização das mesmas no meio acadêmico e em comunidades da Internet, possuindo assim um acervo bem documentado. Além disso, as duas possuem código aberto, permitindo a implementação de mudanças necessárias para avaliação.

A Figura 5.1 ilustra um resumo dos procedimentos implementados em cada ferramenta. No R foi aplicado um conjunto de indicadores genéricos sobre dados de sinais vitais reais de frequência respiratória. Esses dados foram divididos em séries temporais menores com janelas de tamanho de 14 minutos, para englobar a duração do evento crítico presente nos traços reais (detalhado na Seção 5.1.2). Para cada série temporal criada foi aplicado o conjunto de indicadores genéricos e arquivado o histórico dos resultados. Esse arquivo de saída, com os resultados dos indicadores, serviu como entrada para a implementação no NS-3. No simulador, esse arquivo é analisado à procura de um conjunto de comportamento específico na curva do histórico desses indicadores, cujo qual aponta a iminência de um evento crítico. Quando identificado esse comportamento, emite-se um alerta médico que recebe o maior nível de prioridade e é transmitido seguindo um acesso ao meio prioritário para os alertas.

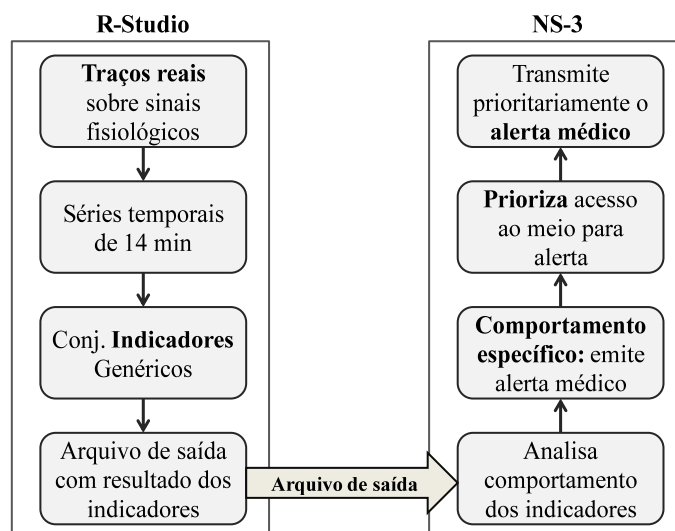


Figura 5.1: Metodologia de implementação do SANTE

No R foi utilizado a biblioteca *Early Warning Signals Toolbox* que possui as funções referentes ao conjunto de indicadores genéricos [SPARCS, 2016]. Essa biblioteca foi desenvolvida pelo grupo de pesquisadores que conceituaram a predição da iminência de eventos críticos na literatura [Dakos et al., 2012]. A biblioteca está disponível em código aberto e possui diversos métodos e funções para auxiliar na identificação antecipada de eventos. Particularmente, a função empregada em SANTE foi a `generic_ews` que estima um conjunto de indicadores genéricos, como autocorrelação, variância e assimetria, para identificação antecipada de eventos críticos sobre dados vitais reais da saúde do paciente.

De forma semelhante, no simulador foram utilizados módulos e classes próprios do NS-3, adicionando extensões e alterações quando necessário. Para coleta de dados durante a simulação foi empregada a classe de estatística, que coletou perdas de pacotes e atrasos dos diferentes tipos de tráfego na rede. Para a geração de tráfego típico da Internet, como voz e vídeo, foi utilizada a classe de aplicações `OnOffApplication`, e para a geração de tráfego dos alertas médicos foi criada a classe `MeuAlertaApp`. A priorização de acesso ao meio dos

alertas, através da redução dos *slots* da janela de contenção e espaço arbitrário entre quadros (AIFS), foi implementada alterando esses parâmetros na classe `WifiMac`. E os gráficos foram gerados por meio do *Gnuplot* seguindo os arquivos de saída do simulador.

### 5.1.2 Traços Reais sobre Sinais Vitais

Os dados empregados neste trabalho são do banco de dados *PhysioNet* que possui uma grande quantidade de sinais fisiológicos e dados relacionados à saúde [AL et al., 2000]. Tal banco contém em torno de quarenta mil gravações de dados disponibilizados por laboratórios e pesquisadores. Neste trabalho foi utilizada a base de dados MIMIC que inclui gravações de batimentos cardíacos, respiração, pressão sanguínea, entre outros [Moody e Mark, 1996]. Esses dados foram coletados a partir de diferentes pacientes que estavam sob monitoração nas unidades de cuidados intensivos cardíacos e cirúrgicos do *Boston's Beth Israel Hospital*, gravados durante 24 e 48 horas continuamente [Institutes of Health, 2016]. Essa base MIMIC fornece sinais vitais em formato numérico e um documento que descreve o contexto de cada gravação informando a idade, doença e sinais vitais coletados dos pacientes.

A base de dados MIMIC foi criada com o intuito de incentivar o desenvolvimento de novas medidas que auxiliem a monitoração médica intensiva. Em vista disso, os pacientes observados durante gravação são hemodinamicamente instáveis, com pressão arterial persistentemente anormal, e com isso, apresentam o desenvolvimento de eventos críticos. Nesses pacientes repentinas alterações na pressão do sangue podem significar sérios comprometimentos na saúde. Devido a isso, tais pacientes são considerados críticos e desafiadores para os profissionais da saúde, onde graves eventos como traumas, hemorragia e arritmia cardíaca, necessitam de intervenção rápida dos médicos [Moody e Mark, 1996].

Por possuir dados de pacientes com estados críticos, a base de dados MIMIC foi escolhida neste trabalho. Uma vez que a aplicação eficiente do conjunto de indicadores genéricos para a identificação antecipada de eventos críticos requer séries temporais com dados que possuem pelo menos um evento crítico [Dakos et al., 2012]. Por isso, foi utilizado traços reais de frequência respiratória de um paciente masculino de 70 anos com edema pulmonar, ilustrados na Figura 5.2. Esse paciente foi monitorado durante 11 horas e 11 minutos na UTI do hospital, onde, em torno do minuto 15, o paciente sofreu uma insuficiência respiratória que durou em torno 14 minutos (destacado pela caixa vermelha na figura). Como o paciente estava no hospital usando aparelhos respiratórios ele conseguiu voltar à estabilidade vital [Moody e Mark, 1996].

Os indicadores estatísticos apontam a tendência de ocorrer um evento crítico, com o intuito de prevê-lo. Para realizar essa previsão, os dados que precedem o evento crítico devem apresentar o conjunto de comportamento específico dos indicadores genéricos, para assim apontar o possível evento no futuro próximo. Devido a isso, a série temporal completa correspondente aos dados do paciente acima mencionado foi dividida em séries temporais menores com janelas de tempo de 840 segundos (ou 14 minutos) cada. As séries temporais foram assim dimensionadas para englobar o evento crítico alvo, que teve essa duração de aproximadamente 840 segundos, e assim prevê-lo na série temporal que o precede. Nos estudos sobre os indicadores genéricos [Dakos et al., 2012] não há um tamanho específico para as séries temporais, pelo fato deles serem aplicados em diversas áreas como mercado financeiro, doenças humanas e clima. Por consequência, deve-se analisar o contexto dos dados empregados para definição do tamanho da janela. Nesse trabalho, foi observado o contexto e duração do evento crítico e o comportamento dos dados vitais. Com isso, foi definido o tamanho de 840 segundos para ter uma série temporal que abrange o evento crítico por completo, uma série que precede o evento e o restante das séries com dados normais de respiração, totalizando 23 séries temporais.

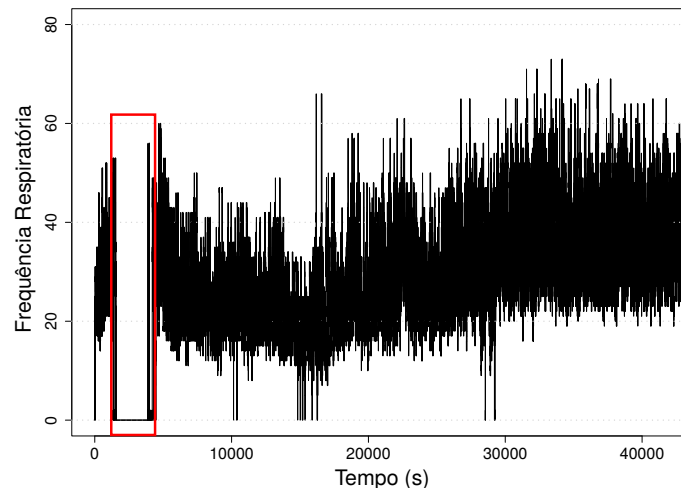


Figura 5.2: Traços reais de frequência respiratória

Dessa maneira, os indicadores foram aplicados em cada uma dessas séries e assim, espera-se que a identificação do evento crítico, mapeado pelos indicadores, deva acontecer na série temporal de 840 segundos que precede o evento (apresentado na Figura 5.3), similar aos experimentos realizados na literatura [Dakos et al., 2012].

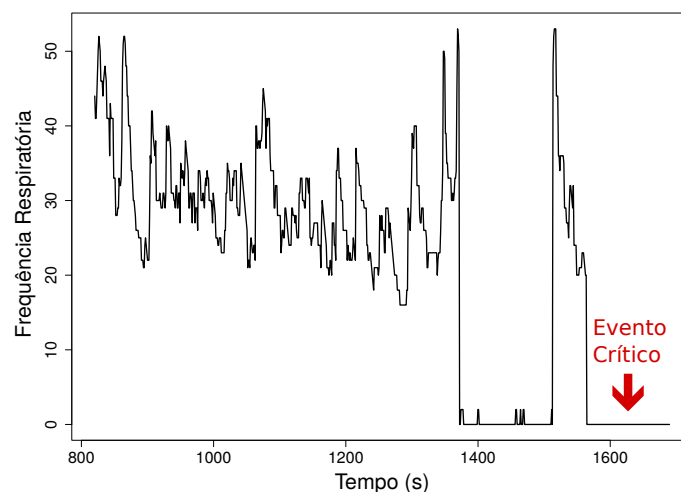


Figura 5.3: Série temporal com janela de 840 segundos (ou 14 minutos) que precede o evento crítico de insuficiência respiratória. Por isso, a série temporal inicia no tempo 800 segundos e termina no tempo 1640 segundos (momentos iniciais do evento).

### 5.1.3 Cenários e Parâmetros

No NS-3, os experimentos contaram com um cenário de simulação próximo aos ambientes domésticos, ilustrado na Figura 5.4. Este cenário conta com apenas um ponto de acesso (AP) e várias pessoas utilizando seus dispositivos móveis. Dentre essas pessoas, algumas são monitoradas por aplicações médicas (AppMédicas) que geram alertas. Enquanto as outras pessoas estão executando aplicativos gerais (AppGerai), como redes sociais (exemplo Facebook

e twitter). Nesse cenário, o AP centralizado possui duas interfaces de rede. Ele recebe dados dos dispositivos móveis via WiFi (802.11n) e transmite os alertas médicos para o servidor do hospital via Ethernet. O cenário abrange uma área de cobertura de 50m x 50m com os dispositivos móveis espaçados entre eles com distâncias em torno de 3 metros, sem considerar mobilidade. Em um cenário mais realístico, haveria o AP da rede doméstica e o AP do hospital, porém o escopo do cenário foi reduzido para apenas um AP.

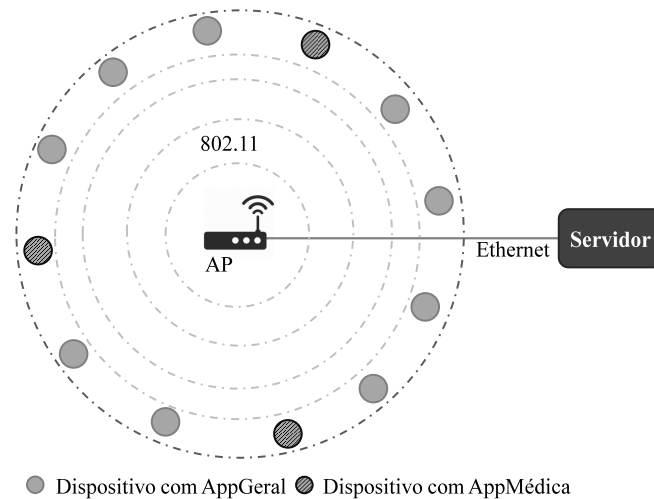


Figura 5.4: Cenário de avaliação

Os dispositivos móveis consistem de *smartphones* que possuem aplicações médicas ou aplicações gerais, ambas gerando fluxos de dados UDP. Os dispositivos com aplicações médicas representam os coordenadores WBAN e enviam apenas alertas médicos aleatórios a cada 1,5 segundos para o servidor do hospital. Os dispositivos móveis com aplicações gerais enviam dados normais de rede, voz e vídeo para o AP, com fluxos de dados do tipo ON/OFF. Os fluxos de dados de voz e vídeo são constantes conforme aplicações de videoconferências. Enquanto, os fluxos de dados normais são gerados em rajadas de acordo com uma distribuição de Pareto, similar aos que representam o tráfego Web predominante em *hotspots* públicos [Divgi e Chlebus, 2013].

A quantidade de dispositivos móveis com aplicações gerais variou a cada amostragem da simulação, iniciando com 5 dispositivos móveis e encerrando com 35. Esse processo foi repetido 35 vezes, reiniciando os contadores e o gerador de números aleatórios do simulador a cada amostragem. Em todas as execuções, além dos dispositivos móveis com aplicações gerais, há 10 dispositivos com aplicações médicas emitindo alertas aleatórios. Assim, em um cenário denso totaliza 45 dispositivos acessando o meio sem fio. As simulações foram realizadas com dois diferentes cenários: o primeiro empregando um sistema tradicional sem identificação e priorização de alertas médicos, e o segundo utilizando o sistema SANTE proposto.

As análises foram realizadas sobre um contexto de canal saturado com 100 Mbps de fluxos de dados normais de rede para sobrecarregar o canal WiFi, a fim de testar o envio prioritário dos alertas médicos em situações de sobrecarga no ambiente. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros utilizados em cada fluxo de tráfego. Os fluxos de vídeo apresentam taxas de dados de 384 Kbps, tal qual um fluxo de vídeo durante videoconferências. Os pacotes de alertas médicos receberam valores de tamanho e taxa de dados similares as WBANs [Bhandari e Moh, 2016], e os pacotes de voz seguiram valores semelhantes as aplicações de áudio [IEEE, 2012]. Os diferentes tipos de tráfegos foram marcados com níveis de prioridades conforme as categorias de acesso do WiFi, seguindo a ordem de prioridade de voz, vídeo e dados normais. Os alertas

médicos recebem o nível mais alto de prioridade, sendo rotulados como sendo da categoria de acesso AC\_AM, criada em SANTE.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações

Tráfego	Prioridade	Tamanho do Pacote	Taxa de Dados
Normal de rede	AC_BE	1450 bytes	100 Mbps
Vídeo	AC_VI	1316 bytes	384 Kbps
Voz	AC_VO	64 bytes	64 Kbps
Alerta Médico	AC_AM	50 bytes	50 Kbps

A identificação antecipada de eventos críticos na saúde dos pacientes foi realizada no R por meio do conjunto de indicadores estatísticos proposto em [Dakos et al., 2012]. Esses indicadores possuem o objetivo de prever a iminência de um evento crítico. Para tal fim, eles foram estimados em cada uma das séries temporais com janelas de 14 minutos, criadas a partir dos dados vitais de frequência respiratória, aplicando filtro gaussiano com valor 10. Espera-se que a identificação do evento crítico, apresentando um conjunto de comportamento específico nos indicadores, deva acontecer na série temporal que precede o evento (ilustrada na Figura 5.3). Assim, quando identificado o evento, alertas médicos são gerados e priorizados no NS-3 com base no resultado do coeficiente de correlação *Kendall tau* de cada indicador. Esse coeficiente mede a força da tendência da curva dos indicadores, onde quanto maior a força, maior a probabilidade da ocorrência de um evento crítico. Por exemplo, quando o coeficiente *Kendall tau* apresentar valor maior ou igual a 0.65 na medida de autocorrelação, considera-se uma forte tendência. Em função da identificação do alerta ter sido feita no R-Studio, enquanto a transmissão prioritária e o cenário de simulação no NS-3, foram feitas algumas suposições: (i) os sinais vitais são coletados pelos sensores corporais de uma WBAN e enviados ao coordenador da WBAN (dispositivo móvel com aplicações médicas); (ii) o AP tem recursos computacionais suficientes para retransmissão dos dados recebidos ao servidor do hospital.

#### 5.1.4 Métricas

Para avaliar o desempenho do conjunto de indicadores estatísticos genéricos sobre sinais vitais reais foram considerados os indicadores de autocorrelação, desvio padrão (variância), taxa de retorno, assimetria e curtose. Essas medidas foram estimadas por meio da função `generic_ews` correspondente aos indicadores, que implementa o cálculo de cada medida. Para uma avaliação rigorosa, esses indicadores foram estimados para cada série temporal criada com janela de 840 segundos (14 minutos) referente aos dados vitais reais (detalhados na Subseção 5.1.2). Entre essas séries, há séries que possuem apenas dados vitais normais, uma série com dados do evento crítico alvo e uma série temporal com transições críticas que precede tal evento. Dessa maneira, comparou-se o conjunto de comportamento obtido nos indicadores durante uma transição crítica (para indicação antecipada do evento alvo) com o comportamento referente a dados normais sobre os sinais vitais.

No simulador NS-3, foram medidos os valores médios das métricas de atraso médio e taxa de perda de quadros. Os resultados, quando não mencionados de outra forma, são intervalos de confiança, com 95% de nível de confiança. O atraso médio consiste da soma da latência de todos os quadros recebidos dividido pelo número total de quadros recebidos (Equação 5.1). A taxa de perda é a diferença do número total de quadros transmitidos pelo número total de quadros

recebidos (Equação 5.2). Cada uma dessas medidas estatísticas foi calculada para cada fluxo de tráfego e cenário considerado no ambiente de simulação.

$$\text{Atraso Médio} = \frac{\text{Latência Total dos Quadros Recebidos}}{\text{Quadros Recebidos}} \quad (5.1)$$

$$\text{Taxa de Perda} = \frac{\text{Quadros Transmitidos}}{\text{Quadros Recebidos}} \quad (5.2)$$

## 5.2 Resultados

As próximas subseções descrevem e analisam os resultados atingidos na identificação antecipada de eventos críticos em sinais vitais e na transmissão prioritária de alertas médicos sobre as redes WBANs e WLANs. Inicialmente, o texto apresenta e discute os resultados estatísticos obtidos através dos indicadores genéricos em traços reais. Em seguida, o texto discorre sobre as métricas obtidas nos experimentos, por meio de simulações em ambiente de redes, e descreve o impacto da transmissão prioritária do sistema SANTE sobre os diferentes tipos de tráfegos das redes 802.11.

### 5.2.1 Resultados dos Indicadores Genéricos

A avaliação do conjunto de indicadores genéricos sobre traços reais de frequência respiratória apresentou resultados com um comportamento semelhante ao visto na literatura [Dakos et al., 2012]. A Figura 5.5 ilustra os resultados obtidos na aplicação de tais indicadores para a identificação antecipada de eventos críticos na saúde de pacientes. A série temporal com dados respiratórios apresentado no primeiro gráfico da Figura 5.5 (a) aponta uma transição crítica em direção ao evento de insuficiência respiratória, sendo a mesma série temporal descrita na Figura 5.3, que precede o evento crítico alvo. Durante a transição há uma alteração brusca de estado do paciente, onde os valores alteraram de 50 para 0 na frequência respiratória. Sendo que os dois últimos minutos da série temporal compreendem os estágios iniciais do evento crítico, que foram necessários para estimação dos indicadores. Enquanto os dados ilustrados no primeiro gráfico da Figura 5.5 (b) consistem de sinais respiratórios normais variando entre 10 e 40 os valores das observações, sem apresentar transições críticas. Os indicadores foram estimados em ambas as séries temporais, a fim de comparar o comportamento dos indicadores em situações críticas e normais. Note que a curva dos indicadores de ambas as figuras abrangem 50% dos dados da séries temporais, sendo esse o padrão de aplicação dos indicadores.

O conjunto de tendências das curvas dos indicadores nos gráficos da Figura 5.5 (b) apresentam o inverso do esperado (comportamento esperado: aumento da autocorrelação, variância, assimetria e curtose, e queda da taxa de retorno, veja seção 2.4.1 do capítulo 2), pois os dados de respiração desta janela de tempo não possuem alterações abruptas. Dado que os indicadores apenas apresentam o conjunto de comportamento específico, para predição da tendência de eventos críticos, se os dados possuírem mudanças bruscas em seus estados. Isto é, perturbações, como ingestão de medicamentos, que causam instabilidade no estado do paciente, como aumento dos batimentos cardíacos. Por outro lado, na série temporal com transição crítica ilustrada na Figura 5.5 (a), os resultados dos indicadores apresentam o comportamento esperado para a identificação da iminência de eventos críticos. A **autocorrelação** apresenta um aumento considerável, apontando assim forte relação entre as observações respiratórias. Isso, indica forte tendência dos valores de respiração permanecerem em torno de 0 e ocorrer de fato o evento crítico. A queda na **taxa de retorno** confirma que o paciente sofreu perturbações próximas ao

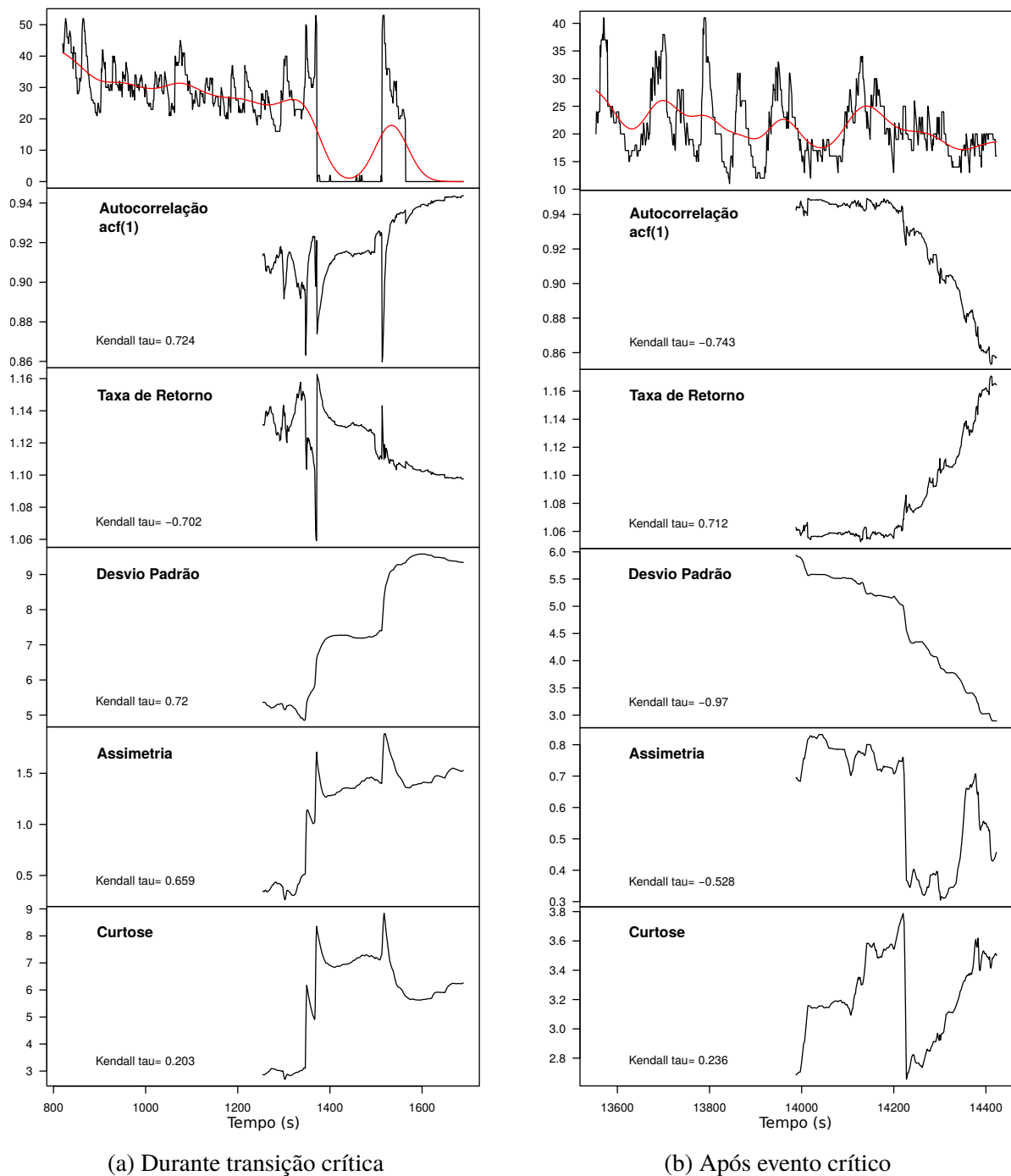


Figura 5.5: Indicadores genéricos durante e após transição crítica

evento de insuficiência respiratória. Além disso, a variação brusca entre 0 e 50 dos valores das observações respiratórias, causou um aumento na **variância** dos dados medida pelo desvio padrão, o que aponta instabilidade no estado do paciente.

Além disso, a queda dos valores das observações justifica o aumento da **assimetria** positiva da distribuição dos dados. Isso indica que há uma alta concentração dos sinais respiratórios em torno de valores baixos, apontando assim a tendência do estado da doença permanecer em um estado crítico nas próximas observações. Também, a existência de valores extremos e raros nos dados observados causa um aumento na **curtose**, indicando que o estado da doença não se encontra estável. Esse conjunto de comportamento dos indicadores apresentando



um aumento na autocorrelação, desvio padrão, assimetria e curtose, associado com uma queda na taxa de retorno aponta a possibilidade de ocorrer um evento emergencial na saúde do paciente. Como é sabido que ocorre de fato o evento de insuficiência respiratória na janela de tempo subsequente à janela utilizada para obtenção dos indicadores da Figura 5.5 (a), e os resultados apresentam o comportamento visto na literatura, foi possível mostrar que tais indicadores estatísticos podem indicar a iminência de eventos críticos em sinais vitais reais. Nos resultados apresentados, foi possível identificar o evento de insuficiência respiratória 760 segundos (12 minutos) antes de acontecer o evento de fato, utilizando apenas 120 segundos de dados críticos de uma janela de 840 segundos (14 minutos).

Um ponto interessante para observar a diferença no conjunto de comportamento dos indicadores das Figuras 5.5 (a) e (b) é analisar os valores do coeficiente *Kendall tau*. Vale ressaltar que o resultado do coeficiente *Kendall tau* varia entre -1 e +1, sendo que resultados próximos de 0 indicam pouca força na tendência da curva do indicador (detalhado na Seção 2.4.1 do Capítulo 2). Nos gráficos da Figura 5.5 (a) esse coeficiente apresenta valores positivos altos, geralmente acima de 0.6 para os indicadores de autocorrelação, variância e assimetria, o que indica uma forte tendência da curva do indicador continuar aumentando. E ainda, possui valor negativo em torno de -0,7 na taxa de retorno, o que aponta retorno lento à estabilidade no estado do paciente. Visto que esses comportamentos, aumento da autocorrelação, assimetria, variância e curtose, e queda da taxa de retorno, consistem do conjunto de comportamento esperado dos indicadores para predição de evento crítico. Em contrapartida, os valores do coeficiente obtidos nos indicadores da Figura 5.5 (b) apresentam, em sua maioria, valores negativos na autocorrelação, variância e assimetria, e uma taxa de retorno alta positiva, comportamento completamente inverso do qual é esperado para identificar um evento crítico.

## 5.2.2 Resultados das Simulações

Toda vez que o conjunto de comportamento específico dos indicadores é encontrado nos dados observados, o sistema SANTE emite um alerta médico a fim de reportar os profissionais da saúde. Uma vez que esse conjunto de comportamento aponta a tendência de ocorrer um evento crítico no estado de saúde do paciente no futuro próximo. Por consequência, esses alertas requerem o menor atraso possível em sua transmissão. Os gráficos da Figura 5.6 (a) e 5.6 (b) apresentam o atraso médio observado na transmissão dos alertas médicos e dos demais tipos de tráfego considerados sobre os cenários com e sem o sistema proposto. Com pouca quantidade de dispositivos móveis (estações), ambos os cenários apresentam atrasos médios baixos para os alertas médicos. Note que os demais tipos de tráfego considerados também apresentam resultados estatisticamente equivalentes. No entanto, conforme o número de dispositivos aumenta na rede, fica evidente os ganhos que a nova abordagem de identificação antecipada de eventos críticos e priorização de tráfego de alertas trás.

Neste contexto, conforme a Figura 5.6 (c), por exemplo, o cenário com 20 dispositivos e sem o uso do novo sistema apresenta atrasos, em média, de 58 ms. Por outro lado, nas mesmas condições, o uso do novo sistema reduz os atrasos para cerca de 26 ms. Em um cenário ainda mais denso, com 25 dispositivos, o novo sistema é capaz de apresentar atrasos inferiores a 89 ms, enquanto um sistema tradicional tem atrasos médios de 188 ms. Em especial, em cenários densos com 30 e 35 dispositivos, o cenário sem o uso do sistema proposto não consegue suportar a latência máxima desejada para aplicações médicas (125 ms) alcançando atrasos de 350 ms (Figura 5.6 (c)). Em contrapartida, o uso do novo sistema SANTE reduz esse atraso para cerca de 224 ms. Embora o sistema SANTE também não tenha atingido uma latência menor que a máxima aceitável para os alertas neste último cenário, ainda assim ele conseguiu reduzir em torno

de 126 ms de atraso nos alertas quando comparado ao atraso do sistema tradicional. Finalmente, a adoção do sistema SANTE não apresenta impactos nos demais tipos de tráfego.

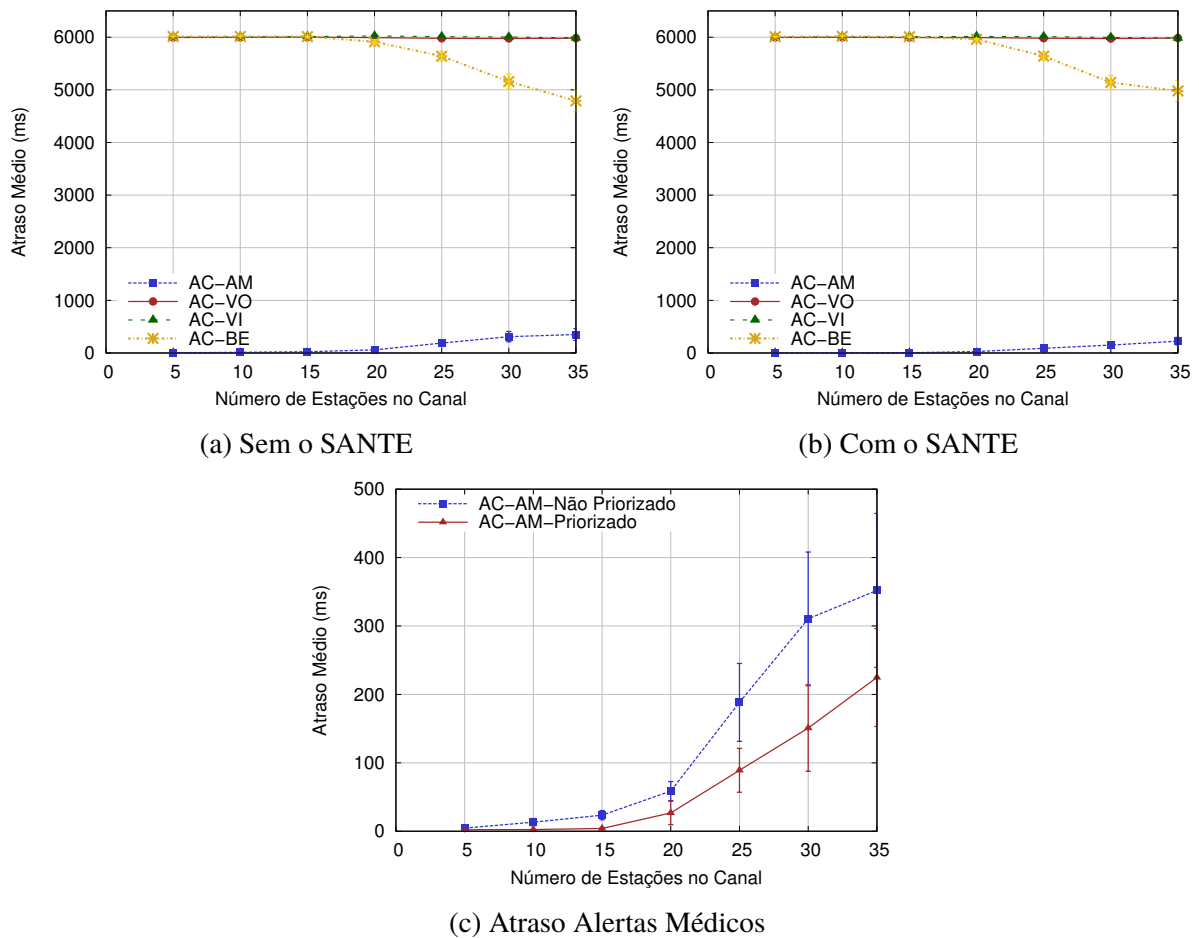


Figura 5.6: Atraso médio *versus* densidade da rede

As Figuras 5.7 (a) e 5.7 (b) apresentam a taxa de perda de quadros dos fluxos de dados sobre os dois cenários considerados, com e sem o sistema proposto. Em ambos os cenários, os alertas médicos foram entregues em sua totalidade considerando pouco número de dispositivos móveis no canal. Os demais tipos de tráfego considerados apresentam resultados de perda semelhantes nos dois cenários. Porém, conforme a quantidade de dispositivos móveis aumentou, a taxa de perda aumentou para todos os tráfegos dada a saturação do canal. Entretanto, são visíveis os ganhos que o sistema proposto oferece para o tráfego dos alertas médicos. Em um cenário denso, com 30 dispositivos móveis e sem o uso do sistema SANTE, a taxa de perda de alertas foi em cerca de 26%. Por outro lado, o mesmo número de dispositivos no canal, empregando o sistema SANTE, apresenta taxas de perda de 13%. Considerando um cenário mais denso e sem o uso do SANTE as taxas de perda ficam em torno de 41%. Quando se utiliza o SANTE, nas mesmas condições, as perdas reduzem para 33%.

As perdas dos outros fluxos de tráfego, referentes a dados de voz, vídeo e normais de rede, não sofrem impacto com o sistema SANTE. Uma vez que as taxas de perda apresentadas foram semelhantes com e sem o uso do sistema proposto. Em um cenário com poucos dispositivos móveis acessando o meio sem fio as perdas são baixas para os tráfegos de voz e vídeo, onde apenas o tráfego normal de rede apresenta taxas de perda em torno de 50%. Já em um cenário mais denso, com 30 dispositivos no meio sem fio, as perdas aumentam para todos os tipos de tráfego em ambos os casos (com e sem o sistema SANTE), devido à saturação do canal. Visto

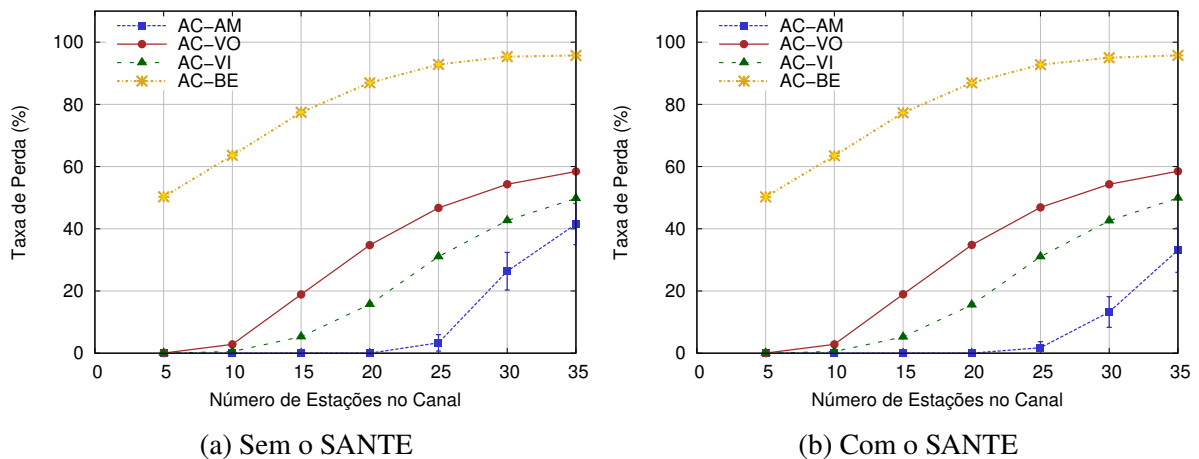


Figura 5.7: Taxa de perda *versus* densidade da rede

que novamente os dados normais de rede apresentam as maiores taxas de perdas, em torno de 95%, em função de sua baixa prioridade definida no padrão 802.11. Dessa maneira, confirma-se que SANTE não prejudica as perdas dos demais tipos de tráfego presentes no meio sem fio.

### 5.3 Resumo

Este capítulo apresentou a avaliação de desempenho do sistema SANTE, detalhando o ambiente de avaliação, os traços reais sobre sinais fisiológicos utilizados, cenários e parâmetros de simulação e análises estatísticas. Além disso, o capítulo discorreu sobre os resultados atingidos no uso do conjunto de indicadores estatísticos genéricos para auxiliar na identificação antecipada de eventos críticos na saúde do paciente, os quais mostraram o comportamento esperado para predição da tendência de eventos usando traços reais vitais. Adicionalmente, foram detalhados os resultados sobre o atraso médio e a taxa de perda dos diferentes fluxos de tráfego observados nos experimentos de simulação. Visto que o sistema SANTE foi capaz de melhorar a latência dos alertas reduzindo as perdas dos mesmos, e, ainda, sem prejudicar os outros tipos de tráfego presentes no meio sem fio, como voz e vídeo.

# Capítulo 6

## Conclusão

Este trabalho propôs o sistema SANTE (do inglês, *System for Anticipated Identification and Transmission of Medical Alerts on WBAN/WLAN*) com o intuito de prever eventos críticos na saúde dos pacientes e transmitir imediatamente alertas médicos sobre esses eventos aos profissionais da saúde diante de um contexto híbrido WBAN/WLAN. Para tal fim, foi realizada uma revisão de conceitos e métodos utilizados nas WBANs para a identificação de situações críticas em sinais vitais e transmissão de mensagens emergenciais. Essa revisão também considerou estudos que integram as redes WBANs com outras redes sem fio (exemplo WLANs) na transmissão dos alertas até o seu destino final. Em paralelo, foram realizados estudos sobre as técnicas de identificação antecipada de eventos críticos em doenças humanas propostas em [Dakos et al., 2012], para a compreensão do funcionamento do conjunto de indicadores genéricos. Dessa forma, esse material embasou e auxiliou o projeto do sistema SANTE.

O sistema SANTE auxilia a apontar tendências no comportamento dos sinais vitais sobre a iminência de eventos críticos por meio de um conjunto de indicadores estatísticos. Quando o sistema indica uma tendência sobre algum evento crítico, o sistema gera alertas médicos e atribui aos mesmos o maior nível de prioridade de acesso ao meio da WLAN. Desse modo, o sistema oferece um tratamento adequado aos dados emergenciais e permite que os profissionais da saúde reajam em tempo hábil para salvar vidas. De forma geral, os resultados observados nas análises estatísticas e simulações apontam a viabilidade da aplicação dos indicadores genéricos para auxiliar na predição de eventos críticos em traços reais de sinais fisiológicos. De fato, o sistema SANTE foi capaz de identificar o evento crítico avaliado, reduzir em 39% o atraso nas transmissões de alertas médicos e 8% as perdas dos mesmos. Além disso, o sistema SANTE não concorre com os outros tipos de tráfego, como voz e vídeo, no acesso ao meio compartilhado para transmissão até os centros de saúde. Por fim, espera-se que este estudo, juntamente com o sistema proposto, contribua com a integração das WBANs e as aplicações médicas e com as outras redes e tecnologias sem fio.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Os resultados alcançados e as conclusões acima apresentadas demonstram que este trabalho atingiu os objetivos propostos. Conforme os resultados, os indicadores genéricos empregados no sistema SANTE podem ser aplicados em dados empíricos para indicar a iminência de eventos críticos em sinais vitais reais de pacientes. Além do mais, o sistema apresentou a redução na latência e na perda da transmissão dos alertas médicos. Contudo, apesar dos resultados positivos, para atingir o comportamento esperado dos indicadores a identificação do evento crítico empregou, de uma janela de 14 minutos, 2 minutos referentes aos dados críticos

iniciais do evento alvo. Assim, novas análises dos indicadores são necessárias para a redução dessa janela. Para isso, a aplicação dos indicadores em outros dados vitais de diferentes pacientes é necessária para análises mais profundas. Também, em um cenário denso, com 45 dispositivos no meio sem fio, os alertas médicos tiveram atrasos maiores que 125 ms (latência máxima aceita pelos alertas conforme normas da WBAN). Além disso, os custos computacionais, como gasto de energia e memória, não foram alvos desse trabalho (custo para dispositivo móvel do paciente). Por isso, sugere-se que em trabalhos futuros novas pesquisas sejam feitas para redução desse atraso dos alertas médicos em ambientes densos e que outras métricas estatísticas, relacionadas ao custo computacional, sejam consideradas nas análises e avaliações.

## **6.2 Publicações**

A fim de auxiliar novos trabalhos, foi publicado um artigo sobre o estudo desta dissertação [Vergutz et al., 2017]. Nele os conceitos e revisão bibliográfica, a especificação do sistema SANTE e os resultados obtidos na avaliação de desempenho do sistema foram apresentados. Com isso, espera-se que os avanços e resultados apresentados auxiliem e motivem a criação de novos métodos para as aplicações médicas e WBANs, no sentido de melhorá-las e colaborar em seus desenvolvimentos.

## Referências Bibliográficas

- [AL et al., 2000] AL, G., LAN, A., L, G., JM, H., PCh, I., RG, M., JE, M., GB, M., CK, P. e HE, S. (2000). PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation Electronic Pages*, 101(23):e215–e220.
- [Al Masud, 2013] Al Masud, S. M. R. (2013). Study and analysis of scientific scopes, issues and challenges towards developing a righteous wireless body area network. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 3(2).
- [Association et al., 2012] Association, I. S. et al. (2012). 802.15. 6-2012 IEEE standards for local and metropolitan area networks–part 15.6: Wireless body area networks.
- [Banerji e Chowdhury, 2013] Banerji, S. e Chowdhury, R. S. (2013). On IEEE 802.11: Wireless LAN technology. *International Journal of Mobile Network Communications & Telematics (IJMNCT)*, 3(4).
- [Bellalta, 2016] Bellalta, B. (2016). IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*, 23(1):38–46.
- [Bhandari e Moh, 2016] Bhandari, S. e Moh, S. (2016). A priority-based adaptive MAC protocol for wireless body area networks. *Sensors*, 16(3):401.
- [Bradai et al., 2016] Bradai, N., Charfi, E., Fourati, L. C. e Kamoun, L. (2016). Priority consideration in inter-WBAN data scheduling and aggregation for monitoring systems. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 27(4):589–600.
- [Bradai et al., 2015] Bradai, N., Fourati, L. C. e Kamoun, L. (2015). WBAN data scheduling and aggregation under WBAN/WLAN healthcare network. *Ad Hoc Networks*, 25:251–262.
- [Cavallari et al., 2014] Cavallari, R., Martelli, F., Rosini, R., Buratti, C. e Verdone, R. (2014). A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3):1635–1657.
- [Cisco, 2006] Cisco (2006). Diffserv-the scalable end-to-end QoS model. *CiscoSystems*.
- [Crosby et al., 2012] Crosby, G. V., Ghosh, T., Murimi, R. e Chin, C. A. (2012). Wireless body area networks for healthcare: a survey. *International Journal of Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Computing*, 3(3):1.
- [Dakos et al., 2012] Dakos, V., Carpenter, S. R., Brock, W. A., Ellison, A. M., Guttal, V., Ives, A. R., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D. A., van Nes, E. H. e Scheffer, M. (2012). Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data. *PloS one*, 7(7):e41010.

- [Dangi e Panda, 2016] Dangi, K. G. e Panda, S. P. (2016). Performance analysis of patient monitoring wireless body area networks using queueing models. *International Journal of Applied Engineering Research (IJAER)*, 11(9):6671–6675.
- [Divgi e Chlebus, 2013] Divgi, G. e Chlebus, E. (2013). Characterization of user activity and traffic in a commercial nationwide WiFi hotspot network: global and individual metrics. *Wireless Networks*, 19(7):1783–1805.
- [Gündoğdu e Çalhan, 2016] Gündoğdu, K. e Çalhan, A. (2016). An implementation of wireless body area networks for improving priority data transmission delay. *Journal Medicine Systems*, 40(3):1–7.
- [Health Organization, 2013] Health Organization, W. (2013). *Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013-2020*. World Health Organization.
- [Health Organization, 2015] Health Organization, W. (2015). Cardiovascular diseases (CVDs). Disponível em <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/en/>. Último acesso em Out/2016.
- [IEEE, 2004] IEEE (2004). IEEE draft for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium access control (MAC) enhancements for quality of service (QoS). *IEEE Standard 802.11e/Draft 11.0*.
- [IEEE, 2012] IEEE (2012). IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems–local and metropolitan area networks–specific requirements–part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. *IEEE Technical Report Standard 802.11*.
- [Institutes of Health, 2016] Institutes of Health, N. (2016). Physiobank: a large and growing archive of physiological data. Disponível em <https://physionet.org/physiobank/>. Último acesso em Out/2016.
- [Kathuria e Gambhir, 2016] Kathuria, M. e Gambhir, S. (2016). A novel optimization model for efficient packet classification in WBAN. *International Journal Energy, Informatics Communications (IJEIC)*, 7(4):1–10.
- [Kéfi et al., 2007] Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C. L., Pueyo, Y., Papanastasis, V. P., ElAich, A. e De Ruiter, P. C. (2007). Spatial vegetation patterns and imminent desertification in mediterranean arid ecosystems. *Nature*, 449(7159):213–217.
- [Kim e Kim, 2015] Kim, R. H. e Kim, J. G. (2015). Adaptive MAC protocol for emergency data transmission in wireless body sensor networks. *International Journal Software Engineering and Its Applications (IJSEIA)*, 9(9):205–216.
- [Kurose e Ross, 2013] Kurose, J. F. e Ross, K. W. (2013). *Redes de Computadores e a Internet: uma abordagem top-down*. Pearson.
- [Latré et al., 2011] Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C. e Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Networking*, 17(1):1–18.
- [Mack, 2017] Mack, H. (2017). Remote patient monitoring market grew by 44 percent in 2016, report says. Disponível em <http://www.mobihealthnews.com/content/remote-patient-monitoring-market-grew-44-percent-2016-report-says>. Último acesso em Fev/2017.

- [Mattos et al., 2017] Mattos, V. L. D., Konrath, A. C. e Azambuja, A. M. V. (2017). *Introdução à Estatística: Aplicações em Ciências Exatas*. Livros Técnicos e Científicos Editora - LTC.
- [Misra e Sarkar, 2015] Misra, S. e Sarkar, S. (2015). Priority-based time-slot allocation in wireless body area networks during medical emergency situations: An evolutionary game-theoretic perspective. *IEEE Journal Biomedical Health Informatics*, 19(2):541–548.
- [Moody e Mark, 1996] Moody, G. B. e Mark, R. G. (1996). A database to support development and evaluation of intelligent intensive care monitoring. Em *Computing in Cardiology*, páginas 657–660. IEEE.
- [Morettin e Bussab, 2010] Morettin, P. A. e Bussab, W. O. (2010). *Estatística Básica*. Editora Saraiva.
- [Movassaghi et al., 2014] Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D. e Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(3):1658–1686.
- [NS-3 Consortium, 2015] NS-3 Consortium (2015). NS-3 a discrete-event network simulator for internet system. Disponível em <https://www.nsnam.org/>. Último acesso em Nov/2016.
- [R Foundantion, 2016] R Foundantion (2016). The r project for statistical computing. Disponível em <https://www.r-project.org/>. Último acesso em Out/2016.
- [Rashwand e Mistic, 2015] Rashwand, S. e Mistic, J. V. (2015). Bridging between IEEE 802.15.6 and IEEE 802.11 e for wireless healthcare networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks (AHSWN)*, 26(1-4):303–337.
- [Rikkert et al., 2016] Rikkert, M. G. O., Dakos, V., Buchman, T. G., de Boer, R., Glass, L., Cramer, A. O., Levin, S., van Nes, E., Sugihara, G. e Ferrari, M. D. (2016). Slowing down of recovery as generic risk marker for acute severity transitions in chronic diseases. *Critical Care Medicine*, 44(3):601–606.
- [Scheffer et al., 2009] Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E. H., Rietkerk, M. e Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260):53–59.
- [Scheffer et al., 2013] Scheffer, M., van den Berg, A. e Ferrari, M. D. (2013). Migraine strikes as neuronal excitability reaches a tipping point. *PloS one*, 8(8):e72514.
- [Silva et al., 2016] Silva, R., Achir, N., Santos, A. e Nogueira, M. (2016). Avoiding collisions by time slot reduction supporting voice and video in 802.11 networks. Em *IEEE GLOBECOM*, páginas 1–6. IEEE.
- [SPARCS, 2016] SPARCS (2016). Early Warning Signals Toolbox. Disponível em <http://www.early-warning-signals.org/>. Último acesso em Out/2016.
- [Tanenbaum, 2003] Tanenbaum, A. S. (2003). *Redes de Computadores, 4ª edição*. Editora Campus.



- [van de Leemput et al., 2014] van de Leemput, I. A., Wichers, M., Cramer, A. O., Borsboom, D., Tuerlinckx, F., Kuppens, P., van Nes, E. H., Viechtbauer, W., Giltay, E. J., Aggen, S. H. et al. (2014). Critical slowing down as early warning for the onset and termination of depression. *Proceedings National Academy Science*, 111(1):87–92.
- [Vergutz et al., 2017] Vergutz, A., da Silva, R., Vieira, A. B. e Nogueira, M. (2017). Um sistema de identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos sobre WBAN e WLAN. Em *Anais SBRC, Trilha Principal*. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC).
- [Wu et al., 2006] Wu, H., Wang, X., Zhang, Q. e Shen, X. (2006). IEEE 802.11e enhanced distributed channel access (EDCA) throughput analysis. Em *IEEE International Conference on Communications*, volume 1, páginas 223–228. IEEE.