Um Sistema de Identificação Antecipada e Transmissão Prioritária de Alertas Médicos sobre WBAN e WLAN

Andressa Vergütz[1], Rafael da Silva[1], Alex B. Vieira[2], Michele Nogueira[1]

[1]Depto. de Informática – NR2 – Universidade Federal do Paraná (UFPR)
[2]Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

{avergutz,rasilva,michele}@inf.ufpr.br, alex.borges@ufjf.edu.br

Abstract. *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. However, wireless networks suffer from communication constraints, being vulnerable to interferences and losses. Current mechanisms in WBANs and WLANs either are concerned with the detection of critical events or with the priority on data transmission, inexisting solutions to jointly address both aspects. This work presents SANTE, the first* **S***ystem for* **A***nticipated identificatio***N** *and* **T***ransmission of m***E***dical alerts on WBAN/WLAN. Particularly, the system foresees trends about the imminence of critical events on patients' vital signs through a set of statistical indicators. When those trends are identified, SANTE generates medical alerts. It assigns the highest level of priority to those alerts and offers priority on medium access by reducing contention window and AIFS range on WLAN. Even in a dense scenario, simulation results show in average a reduction of 39% in the medical alerts transmission latency and 8% in their losses.*

Resumo. *A identificação antecipada de eventos críticos na saúde dos pacientes atinge seu ápice quando associada à entrega imediata dos alertas aos profissionais da saúde. Entretanto, as redes sem fio apresentam limitações na comunicação, sendo vulneráveis a interferências e perdas. As soluções existentes em redes corporais sem fio (WBANs) e redes locais sem fio (WLANs) ora se preocupam com a detecção de eventos críticos, ora com a transmissão prioritária de dados, sendo inexistentes soluções abordando os dois aspectos juntos. Este trabalho apresenta SANTE (do inglês,* **S***ystem for* **A***nticipated identificatio***N** *and* **T***ransmission of m***E***dical alerts on WBAN/WLAN), o primeiro sistema de identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos no contexto híbrido WBAN/WLAN. SANTE prediz tendências sobre a iminência de eventos críticos no comportamento dos sinais vitais por meio de um conjunto de indicadores estatísticos. Identificadas essas tendências, SANTE gera alertas médicos que recebem o maior nível de prioridade para transmissão e ele oferece prioridade de acesso ao meio através da redução da janela de contenção e intervalo AIFS na WLAN. Os resultados de simulação mostram que, mesmo em um cenário denso, SANTE apresenta uma redução média de 39% na latência de transmissão dos alertas e 8% na taxa de perda.*

1. Introdução

O rápido avanço nas tecnologias de comunicação sem fio e nos nanossistemas tem contribuído com o desenvolvimento de sensores inteligentes implantáveis ou vestíveis no

corpo humano. A união desses sensores e das redes de comunicação, conhecida por Redes Corporais sem Fio (WBANs), permite a coleta e o monitoramento de sinais vitais [Movassaghi et al. 2014]. As WBANs são bem aplicadas em um contexto médico, onde aplicações recebem os dados coletados por sensores e os informam aos profissionais ou centros de saúde. Um benefício desse acompanhamento contínuo é a possível identificação de riscos e problemas de saúde em estágios iniciais [Latré et al. 2011], promovendo cada vez mais o uso dessas aplicações médicas [Cavallari et al. 2014].

Entretanto, 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. Por exemplo, 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]. Porém, a identificação dos eventos críticos para emissão dos alertas ocorre quando estes eventos já estão em progresso. Também, por sua natureza emergencial, esses alertas requerem a transmissão imediata, aceitando no máximo 125 ms de latência [Association et al. 2012]. Esse nível de latência impulsiona melhorias 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, apesar de se esperar que as WBANs sejam dedicadas à aplicação médica, 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], com possíveis consequências desastrosas à saúde do paciente. Desse modo, além de identificar o quanto antes os eventos críticos, se faz necessária a transmissão imediata desses alertas. 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 and Sarkar 2015, Kim and Kim 2015, Kathuria and Gambhir 2016]. Outros estudos propõem mecanismos para a transmissão imediata dos alertas [Gündoğdu and Çalhan 2016, Bhandari and Moh 2016]. No geral, a identificação dos eventos críticos delimita-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 and Misic 2015]. Entretanto, quando considerado essa integração, esses trabalhos classificam os alertas 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 nosso conhecimento, inexistentes estudos que realizam tanto a identificação quanto a transmissão prioritária dos alertas no contexto WBAN/WLAN.

Nesse sentido, este trabalho apresenta o SANTE (do inglês, **S***ystem for* **A***nticipated Identificatio***N** *and* **T***ransmission of M***E***dical Alerts on WBAN/WLAN*), o primeiro sistema para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos nas WBANs integradas às WLANs. Particularmente, o sistema tem como objetivo predizer tendências no comportamento dos sinais vitais sobre a iminência de eventos críticos por meio de um conjunto genérico de indicadores estatísticos. Esses indicadores predizem a ocorrência de eventos críticos, como ataques cardíacos e paradas respiratórias, funda-

mentados na análise de comportamentos genéricos [Dakos et al. 2012]. Quando previsto algum evento crítico, o sistema gera alertas médicos e atribui aos mesmos o maior nível de prioridade de acesso ao meio da WLAN, através de uma nova categoria de acesso exclusiva para os alertas. Desse modo, o sistema oferece um tratamento adequado aos dados emergenciais e permite que os profissionais da saúde reajam em tempo hábil.

Nós avaliamos a eficiência da proposta desse trabalho em duas fases. Inicialmente, na ferramenta R, nós realizamos a identificação dos eventos críticos, onde aplicamos os indicadores estatísticos sobre traços reais de frequência respiratória de um paciente de 70 anos com edema pulmonar [Dakos et al. 2012]. A seguir, avaliamos o desempenho do SANTE no Simulador de Redes NS-3, considerando cenários de ambientes domésticos densos e não densos. A partir do resultado da identificação de evento crítico, criamos o mapeamento de prioridades no NS-3 levando em conta diferentes fluxos de dados e, emitimos alertas médicos nos momentos em que os resultados estatísticos apontam eventos críticos. Na transmissão prioritária, empregamos uma nova categoria de acesso, exclusiva para os alertas médicos, e priorizamos o acesso ao meio na WLAN através da redução da janela de contenção e do intervalo AIFS. Os resultados apontam a viabilidade dos indicadores para predição de eventos críticos em dados vitais empíricos, identificando o evento crítico alvo com 12 minutos de antecedência. SANTE é capaz de reduzir em 39% o atraso nas transmissões de alertas médicos além de reduzir significativamente as perdas.

O restante deste artigo está organizado como segue. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados à identificação e à transmissão prioritária de alertas médicos. A Seção 3 detalha o sistema SANTE. A Seção 4 descreve a avaliação de desempenho juntamente com os resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões e direções futuras.

2. Trabalhos Relacionados

Diferentes trabalhos propuseram tanto a identificação de eventos críticos quanto a classificação de alertas médicos em níveis de prioridades [Misra and Sarkar 2015, Kim and Kim 2015, Kathuria and Gambhir 2016]. Em [Misra and Sarkar 2015], os autores classificam os pacotes de dados conforme o seu índice de prioridade criado segundo características do paciente, como idade, sexo e doença. No estudo de [Kim and Kim 2015], os níveis de prioridades são associados ao tipo do sensor, considerando 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 and Gambhir 2016] utiliza algoritmos de aprendizagem de máquina, como *Support Vector Machine*, 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. No entanto, o uso de limiares específicos de sinais vitais para a identificação de um evento crítico requer conhecimento específico sobre cada sinal vital monitorado e ainda, identifica os eventos críticos quando estes já estão em progresso. Entretanto, todos esses estudos apenas consideram limiares dos sinais na identificação e ignoram os outros fluxos de dados, como voz e vídeo, na priorização do acesso ao meio.

A fim de transmitir imediatamente os dados emergenciais sobre a saúde dos pacientes, os estudos de [Gündoğdu and Çalhan 2016, Bhandari and Moh 2016] propõem mecanismos de transmissão prioritária. O trabalho de [Gündoğdu and Çalhan 2016] propõe o uso de filas não preemptivas no coordenador WBAN (ex. dispositivo móvel

do paciente) para transmissão empregando três níveis de prioridade: dados emergenciais (ECG), sob demanda (requisições específicas de sinais) e normal (sinais periódicos). Em [Bhandari and Moh 2016], os autores classificam os diferentes fluxos de tráfegos nas categorias emergencial (alertas médicos), sob demanda (sinais contínuos, como EEG), 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, a identificação do evento crítico ocorre pela comparação de limiares particulares dos sinais vitais para tomada de decisões, necessitando de conhecimentos específicos dos sinais. Esses trabalhos também não consideram a integração das diferentes redes sem fio e seus níveis de prioridades na transmissão.

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 and Misic 2015] propõem mecanismos para mapear as oito prioridades da WBAN definidas pelo TG6 da IEEE (*Task Group IEEE 802.15.6*) em quatro categorias de acesso das redes 802.11. [Rashwand and Misic 2015] mapeiam os dois maiores níveis de prioridade da WBAN, que engloba alertas médicos e dados de controle da rede, em um nível mais alto da categoria de acesso da WLAN (compreendendo também os 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 detecção de eventos críticos. Além disso, eles priorizam os alertas médicos tal qual tráfego de voz na WLAN e por isso não garantem o tratamento especial que os alertas médicos necessitam. Assim, no melhor do nosso conhecimento, não existem trabalhos que realizam a identificação antecipada de eventos críticos e a transmissão prioritária de alertas médicos no contexto WBAN/WLAN.

3. O Sistema SANTE

Esta seção detalha o sistema SANTE, o primeiro sistema para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos no contexto WBAN/WLAN. Os objetivos do sistema englobam a identificação antecipada de eventos considerados críticos em dados fisiológicos com base em mudanças significativas no comportamento dos mesmos e a transmissão prioritária dos alertas médicos. Tanto a identificação quanto a transmissão têm como objetivo informar os profissionais de saúde o mais rápido possível sobre eventos críticos identificados e, assim, auxiliar na ação rápida desses profissionais.

No escopo deste trabalho, os eventos críticos compreendem situações que podem resultar consequências grave na vida dos pacientes, como um ataque cardíaco ou uma parada respiratória. A gravidade de tais eventos demanda ações imediatas dos médicos e assim, atrasos podem ter consequências sérias. Dessa forma, a possibilidade de predizer a iminência de tais eventos e transmitir imediatamente alertas sobre eles, beneficia a monitoração médica, prevenindo exacerbações de doenças.

Para garantir a identificação antecipada de eventos críticos e a transmissão imediata dos alertas médicos sobre tais eventos nas WBANs e WLANs, a arquitetura geral do

sistema SANTE divide-se em quatro etapas: a *coleta dos dados*, a *predição de eventos críticos*, a *transmissão prioritária dos alertas médicos* e o *envio ao destino final*, ilustradas na Figura 1. A primeira etapa se resume 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 de tendências dos eventos críticos a partir de um conjunto de indicadores estatísticos genéricos a fim de avaliar 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. Com base na classificação de tráfego existente no padrão IEEE 802.11, propomos uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos, a fim de transmitir prioritariamente os mesmos via WiFi. Por fim, a quarta etapa encaminha os dados para o destino final, nesse caso para o profissional da saúde e/ou servidor do hospital. As próximas subseções descrevem detalhadamente estas quatro etapas.

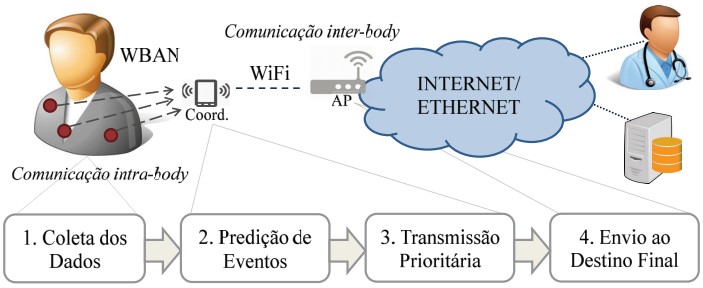


Figura 1. Arquitetura Geral do SANTE

3.1. Coleta dos Dados

Nesta etapa, os dados sobre os sinais vitais do paciente são coletados pelos sensores corporais e são enviados ao 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 1, os dados coletados pelos sensores são transmitidos ao coordenador da WBAN. O coordenador então processa os dados e posteriormente os transmite aos centros de saúde, via Internet ou pela própria Ethernet do hospital [Movassaghi et al. 2014].

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 o sensor de temperatura monitora 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 (ex. ECG), enquanto outros englobam dados periódicos de rotina médica que não possuem tamanha criticidade [Cavallari et al. 2014]. Existem também os dados não médicos presentes no coordenador WBAN, como voz e vídeo. Além dos dados corriqueiros, há os alertas médicos. Estes requerem tratamento prioritário devido à sua natureza emergencial. De fato, os alertas podem informar os médicos sobre eventos críticos que venham ameaçar a vida dos pacientes. Quando antes as tendências desses eventos sejam identificadas e transmitidas ao centro médico, as chances de sobrevivência dos pacientes aumentam.

3.2. Predição de Eventos Críticos

Esta etapa aponta tendências sobre a iminência de situações emergenciais na saúde de pacientes e gera alertas médicos. A identificação antecipada de situações críticas na saúde toma como base um conjunto de indicadores estatísticos genéricos fundamentados em resultados de pesquisas científica realizadas nos últimos anos sobre predição de mudanças abruptas (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 epilépticos, 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) ultrapassar de forma repentina fronteiras críticas, sendo interpretados como mudanças abruptas no estado da saúde do paciente [Scheffer et al. 2009].

Um conjunto de indicadores estatísticos foram definidos para indicar transições críticas por [Scheffer et al. 2009] em diversos sistemas, tais como clima, mercado financeiro e doenças humanas. Neste trabalho, o sistema SANTE toma como base esses indicadores para avaliar as situações na saúde dos pacientes tendo como entrada dados coletados sobre a frequência respiratória. Esses indicadores apontam um evento crítico na saúde dos pacientes quando um conjunto de tendências específicas é encontrado nas curvas resultantes de um curto histórico desses indicadores. A relação entre essas tendências (detalhadas ainda nesta subseção) com as transições críticas foi estabelecida na literatura [Dakos et al. 2012]. Quando 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 que precisa ser enviado a centros médicos a fim de precaver os profissionais sobre a possível necessidade de atendimento emergencial ao paciente.

Particularmente, os indicadores 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 do paciente após perturbações, tais como movimentos do corpo e frequência cardíaca elevada. 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, é esperado nas observações na iminência de um evento crítico. A autocorrelação tende a aumentar conforme o estado da doença se aproxima das fronteiras críticas, indicando que o estado 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].

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. A variância consiste do segundo momento em torno da média de uma distribuição, estimando-a a partir da função de desvio padrão $SD = \frac{1}{n-1}\sum_{n}^{t=1}(z_t - \mu)^2$, onde μ é a média e z a variável analisada. Além disso, a presença de valores distantes no estado crítico provoca uma **assimetria** na curva da distribuição das observações. 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. Quando o estado do paciente alcança valores extremos, próximo a uma transição crítica devido a fortes perturbações, a medida de **curtose** aumenta. A curtose torna-se leptocúrtica, isto é, ela apresenta um aumento na cauda da distribuição das observações [Dakos et al. 2012]. Esse comportamento indica que há a presença de valores raros nas observações dos estados e que o estado do paciente alcançou valores extremos, sinalizando indícios de evento crítico próximo.

Esses indicadores apresentam um comportamento genérico quando o estado do paciente se encontra próximo a uma transição crítica, sendo um aumento 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 da paciente alterar para um estado crítico. Devido a isso, a identificação 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.

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. 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 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. 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.

Neste trabalho criamos uma nova categoria de acesso ao meio exclusiva para os alertas médicos com base em [Silva et al. 2016]. Esta categoria 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 os demais tipos de tráfego. A Figura 2 ilustra a categoria de acesso para o alerta médico em relação às demais categorias.

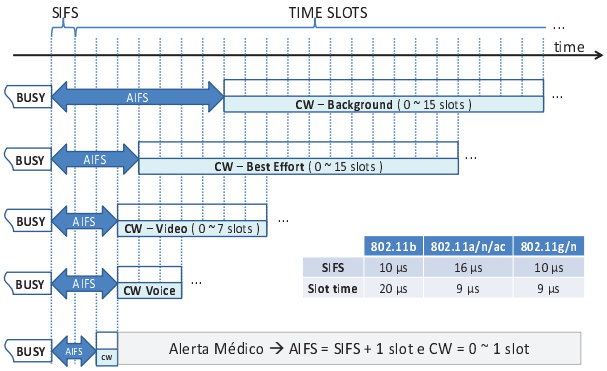


Figura 2. As transmissões iniciam dentro da janela de contenção (CW)

O uso de um intervalo AIFS tão pequeno, praticamente sem contenção, pode ser um problema se houver um grande número de alertas. Todavia, alguns ajustes são feitos para evitar que isto ocorra ou que gere um impasse ou bloqueio do mecanismo. Primeiro, limitamos 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, controlamos o fluxo dos alertas dos dispositivos móveis, evitando rajadas que enfileiram os quadros na camada MAC, promovendo uma melhor distribuição desses fluxos. Terceiro, paramos a transmissão dos alertas tão logo sejam recebidos pelo sistema do centro médico, evitando retransmissões desnecessárias. Por último, emitimos 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.

3.4. Envio ao Destino Final

A transmissão dos alertas médicos do ponto de acesso até o servidor do hospital emprega uma rede cabeada ponto a ponto do próprio hospital. No geral, redes cabeadas costumam contar com diferentes tipos de serviços, dependendo do ambiente de atuação. Assim, consideramos que a rede do hospital ou a rede doméstica possui técnicas de priorização, como DiffService e LLQ, onde pacotes com o mesmo rótulo e tipo de serviço recebem o mesmo tipo de tratamento [Cisco 2006]. 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. Para tanto, espera-se que o centro de saúde ofereça suporte adequado para o tratamento de alertas médicos das WBANs, uma vez que eles envolvem a vida do paciente, de forma que não comprometa o diagnóstico e o monitoramento médico, e ainda, o funcionamento das outras etapas do SANTE.

4. Avaliação de Desempenho

Avaliamos o sistema SANTE através do R[1] e simulações considerando um cenário WBAN/WiFi no NS-3[2]. Particularmente, tomamos como base no R um conjunto de indicadores sobre sinais vitais reais e assim, identificamos a iminência de eventos críticos. Quando identificado um evento crítico, geramos alertas médicos que servem de entrada para as simulações no NS-3. No simulador, classificamos esses alertas como prioritários e os transmitimos seguindo um acesso ao meio prioritário para esses alertas. Nós, então, avaliamos o atraso médio e a taxa de perda seguindo as especificações do SANTE. Comparamos os resultados obtidos aos observados quando utilizamos sistemas tradicionais, sem identificação e priorização de alertas médicos. As próximas subseções descrevem a metodologia de avaliação e apresentam os resultados observados das simulações.

4.1. Metodologia de Avaliação

Nós criamos um cenário de simulação no NS-3 próximo aos ambientes domésticos. 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

[1]R, https://www.rstudio.com/. Último acesso em Dez/2016.

[2]Network Simulator NS-3, https://www.nsnam.org/. Último acesso em Dez/2016.

que geram alertas. Neste 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 destino final, considerado neste caso o servidor do hospital, via Ethernet. Em um ambiente mais realístico, haveria o AP da rede doméstica e o AP do hospital, porém reduzimos o escopo da simulação para apenas um AP.

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 da WBAN e enviam apenas alertas médicos 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 and Chlebus 2013].

A quantidade de dispositivos móveis com aplicações gerais variou a cada amostragem com duração de 13 segundos, 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. 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 proposto.

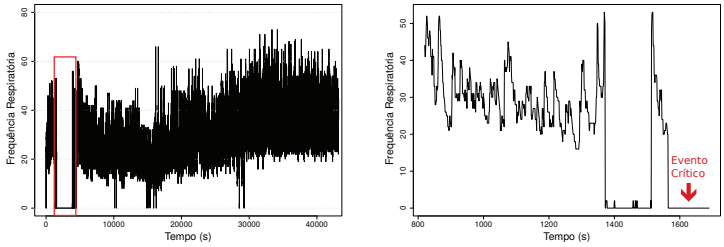
Todas as análises foram realizadas sobre um contexto de canal saturado com 100 Mbps de fluxos de dados normais de rede para sobrecarregar o canal WiFi, a fim de testar o envio prioritário dos alertas médicos em situações de sobrecarga no ambiente. A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados em cada 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 similar as WBANs [Bhandari and 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.

Tabela 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 de pacientes foi realizada no R por meio do conjunto de indicadores estatísticos [Dakos et al. 2012]. A aplicação eficiente desses indicadores requer séries temporais com dados que possuem pelo menos um evento crítico. Por isso, e devido a escassa aplicação dos indicadores em dados empíricos, empregamos traços reais de frequência respiratória de um paciente masculino de 70 anos com edema pulmonar, ilustrados na Figura 3 (a). Esses dados encontram-se

disponíveis na base de dados MIMIC II do *PhysioNet Bank*[3]. Esse paciente foi monitorado durante 11 horas e 11 minutos na UTI de um hospital, onde em torno do minuto 15, o paciente sofreu uma insuficiência respiratória que durou em torno de 14 minutos (destacado pela caixa vermelha na figura). Como o paciente estava no hospital usando aparelhos respiratórios conseguiu voltar à estabilidade vital [Moody and Mark 1996].



(a) Série Temporal Completa (b) Série Temporal de 14 minutos

Figura 3. Traços Reais de Frequência Respiratória

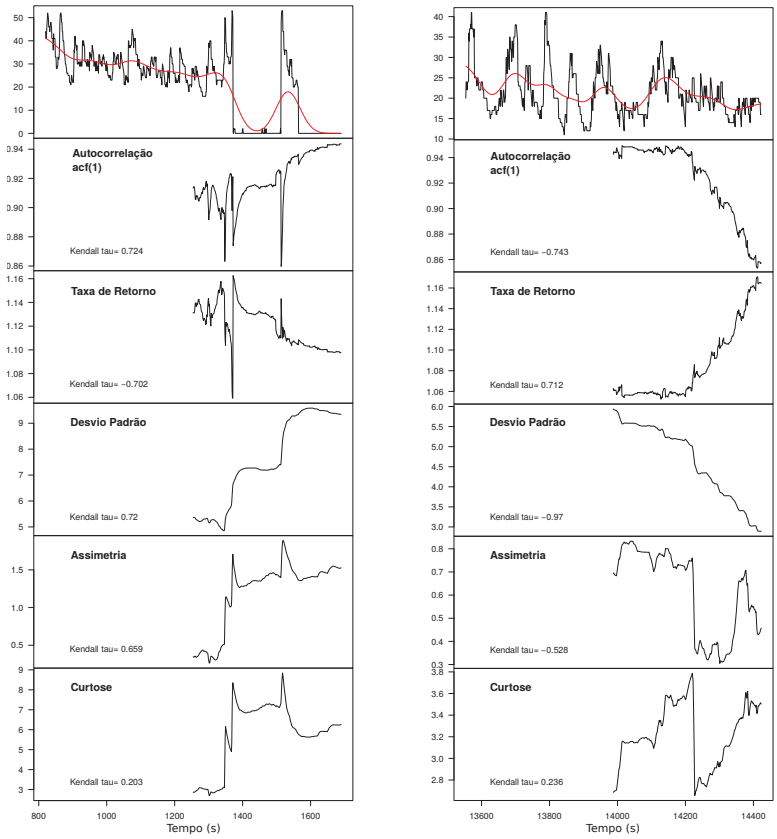
Como os indicadores apontam a tendência de um evento crítico, com o intuito de prevê-lo, quebramos a série temporal completa em séries temporais menores com janelas de tempo de 14 minutos cada. Similar aos experimentos realizados na literatura [Dakos et al. 2012], as séries temporais foram assim dimensionadas para englobar o evento crítico alvo que teve duração de aproximadamente 14 minutos e com isso, identificá-lo na série temporal que o precede (Figura 3 (b)). Para isso, aplicamos os indicadores em cada uma dessas séries e assim, esperamos que o conjunto de comportamento dos indicadores, para identificação do evento alvo, ocorra nesta série temporal que antecipa o evento. Em situações que não se sabe a duração do evento crítico, deve se utilizar janelas de tempo pequenas com poucos minutos, visto que os indicadores apresentam o comportamento esperado apenas próximo às mudanças abruptas. 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. Em função da identificação do alerta ter sido feita no R, enquanto a priorização, transmissão e o cenário de simulação no NS-3, fizemos algumas suposições: (i) os sinais vitais são coletados pelos sensores de uma WBAN e enviados ao coordenador da WBAN (dispositivo móvel com aplicações médicas); (ii) o AP tem recursos computacionais suficiente para retransmissão dos dados recebidos ao servidor do hospital.

Para avaliar o desempenho dos indicadores estatísticos sobre sinais vitais reais, consideramos os indicadores de autocorrelação, taxa de retorno, assimetria, curtose e desvio padrão. No NS-3, foram medidos os valores médios das métricas de atraso médio e taxa de perda de pacotes. 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 pacotes recebidos dividido pelo número total de pacotes recebidos. A taxa de perda é a diferença do número total de pacotes transmitidos pelo número total de pacotes recebidos. Cada uma dessas medidas estatísticas foi calculada para cada fluxo de tráfego e cenário considerado na simulação.

[3]PhysioBank, https://physionet.org/physiobank/. Último acesso em Dez/2016.

4.2. Resultados

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos na aplicação do conjunto de indicadores estatísticos na identificação antecipada de eventos críticos na saúde de pacientes sobre sinais vitais de frequência respiratória. Os dados ilustrados no primeiro gráfico da Figura 4(a) apresentam uma transição crítica em direção ao evento de insuficiência respiratória. Há uma alteração de estado durante a transição, onde os valores alteraram de 50 para 0 na frequência respiratória. 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 4(b) consistem de sinais respiratórios normais variando entre 10 e 40 os valores das observações, sem apresentar mudanças abruptas. Estimamos os indicadores em ambas as séries temporais a fim de comparar o conjunto de comportamento dos indicadores em situações críticas e normais.



(a) Durante transição crítica (b) Após evento crítico

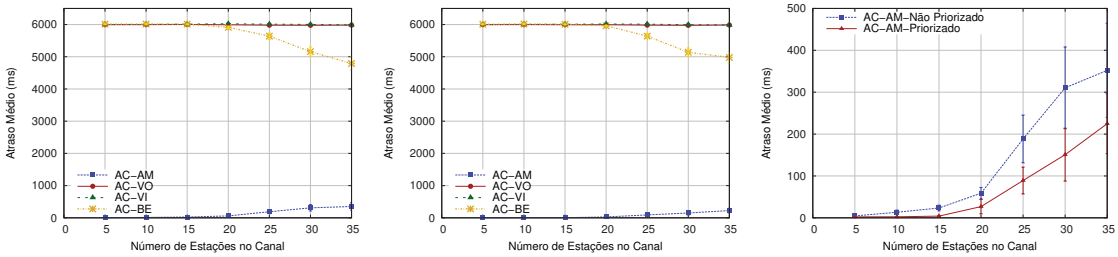
Figura 4. Indicadores Genéricos durante e após Transição Crítica

O comportamento dos indicadores nos gráficos da Figura 4(b) apresentam o inverso do esperado, pois os dados de respiração desta janela de tempo não possuem alterações abruptas, ou seja, os valores dos sinais vitais permaneceram em torno de valores estáveis. Por outro lado, na série temporal com transição crítica ilustrada na Figura 4(a), os resultados dos indicadores apresentam o comportamento genérico esperado para a identificação da iminência de eventos críticos. A autocorrelação aumentou consideravelmente, apontando forte relação entre as observações respiratórias com tendência de permanecer com valores em torno de 0, e ocorrer de fato o evento crítico. A queda na taxa de retorno confirma que o paciente sofreu perturbações próximo ao evento de insuficiência respiratória. Além disso, a variação entre 50 e 0 dos valores das observações

respiratórias, causou um aumento na variância dos dados medida pelo desvio padrão, o que aponta instabilidade no estado de saúde 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 (como valor 0) causa um aumento na curtose, indicando que o estado da doença não se encontra estável. Esse conjunto de comportamentos 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 sabemos que ocorre de fato o evento de insuficiência respiratória na janela de tempo subsequente à janela utilizada para obtenção dos indicadores da Figura 4(a), e os resultados apresentam o comportamento visto na literatura, conseguimos mostrar que tais indicadores estatísticos podem indicar a iminência de eventos críticos em sinais vitais reais. Em nossos resultados, foi possível identificar o evento de insuficiência respiratória 12 min antes de acontecer o evento. Além disso, o uso dos indicadores para a identificação do evento não necessitou de parâmetros específicos do sinal vital empregado nas análises, permitindo assim seu uso genérico.

O sistema SANTE gera alertas médicos quando identificado eventos críticos, a fim de informar os profissionais da saúde. Os gráficos da Figura 5(a) e 5(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. No entanto, conforme o número de dispositivos aumenta na rede, ficam evidente os ganhos que a nova abordagem de identificação de eventos e priorização de tráfego trás. Conforme a Figura 5(c), por exemplo, o cenário com 20 dispositivos e sem o uso do novo sistema apresenta atrasos, na 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. Quando utilizamos o novo sistema, reduzimos esse atraso para cerca de 224 ms. Finalmente, a adoção do SANTE não apresenta impactos consideráveis nos demais tipos de tráfego.

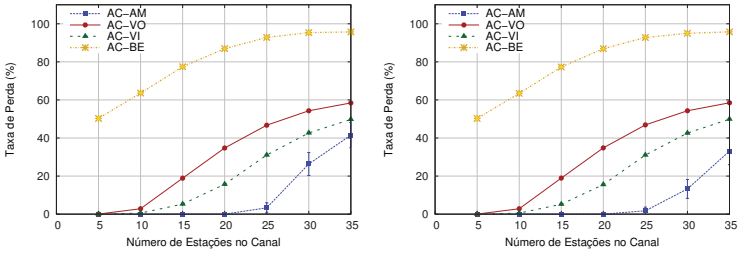


(a) Sem o SANTE (b) Com o SANTE (c) Atraso Alertas Médicos

Figura 5. Atraso Médio *versus* Densidade da Rede

A Figuras 6(a) e 6(b) apresentam a taxa de perda de pacotes dos fluxos de dados

sobre os dois cenários considerados. 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 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 foi em cerca de 26%. Em contrapartida, o mesmo número de dispositivos com o SANTE apresenta taxas de perda de 13%. Um cenário mais denso e sem o uso do SANTE apresenta cerca de 41% de perdas. Quando utilizamos o SANTE, nas mesmas condições, as perdas reduzem para 33%. Por fim, as perdas dos outros tráfegos não sofrem impacto.



(a) Sem o SANTE (b) Com o SANTE

Figura 6. Taxa de Perda *versus* Densidade da Rede

5. Conclusões

Neste artigo, nós apresentamos o SANTE (do inglês, **S***ystem for* **A***nticipated Identificatio***N** *and* **T***ransmission of M***E***dical Alerts on WBAN/WLAN*), o primeiro sistema para identificação antecipada e transmissão prioritária de alertas médicos no contexto híbrido WBAN/WLAN. O SANTE tem por objetivo predizer tendências no comportamento dos sinais vitais sobre a iminência de eventos críticos por meio de um conjunto genérico de indicadores estatísticos. Quando previsto 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. De forma geral, os resultados de nossas simulações apontam para a viabilidade da aplicação dos indicadores estatísticos para predição de eventos críticos em sinais fisiológicos. De fato, o SANTE foi capaz de identificar o evento crítico avaliado e assim, reduzir em 39% o atraso nas transmissões de alertas médicos além de diminuir significativamente as perdas. Além disso, o SANTE não causa impacto sobre os outros tipos de tráfego, como voz e vídeo. Como trabalhos futuros, pretendemos reduzir ainda mais o atraso médio dos alertas, em cenários densos. Adicionalmente, aplicar os indicadores em outros tipos de sinais vitais, a fim de ajustá-los ainda mais e assim, reduzir a janela de dados críticos utilizada na estimação dos mesmos.

Referências

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.

Bhandari, S. and Moh, S. (2016). A priority-based adaptive mac protocol for wireless body area networks. *Sensors*, 16(3):401.

Bradai, N., Charfi, E., Fourati, L. C., and Kamoun, L. (2016). Priority consideration in inter-WBAN data scheduling and aggregation for monitoring systems. *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, 27(4):589–600.

Bradai, N., Fourati, L. C., and Kamoun, L. (2015). Wban data scheduling and aggregation under wban/wlan healthcare network. *Ad Hoc Netw.*, 25:251–262.

Cavallari, R., Martelli, F., Rosini, R., Buratti, C., and Verdone, R. (2014). A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 16(3):1635–1657.

Cisco (2006). Diffserv-the scalable end-to-end QoS model. *CiscoSystems*.

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., and Scheffer, M. (2012). Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data. *PloS one*, 7(7):e41010.

Divgi, G. and Chlebus, E. (2013). Characterization of user activity and traffic in a commercial nationwide WiFi hotspot network: global and individual metrics. *Wireless Netw.*, 19(7):1783–1805.

Gündoğdu, K. and Çalhan, A. (2016). An implementation of wireless body area networks for improving priority data transmission delay. *J. Med. Syst.*, 40(3):1–7.

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 Std. 802.11*.

Kathuria, M. and Gambhir, S. (2016). A novel optimization model for efficient packet classification in wban. *International J. Energy, Inf. Commun.*, 7(4):1–10.

Kim, R. H. and Kim, J. G. (2015). Adaptive mac protocol for emergency data transmission in wireless body sensor networks. *International J. Softw. Eng. and Its Appl.*, 9(9):205–216.

Latré, B., Braem, B., Moerman, I., Blondia, C., and Demeester, P. (2011). A survey on wireless body area networks. *Wireless Netw.*, 17(1):1–18.

Misra, S. and Sarkar, S. (2015). Priority-based time-slot allocation in wireless body area networks during medical emergency situations: An evolutionary game-theoretic perspective. *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, 19(2):541–548.

Moody, G. B. and Mark, R. G. (1996). A database to support development and evaluation of intelligent intensive care monitoring. In *Comput. in Cardiology*, pages 657–660. IEEE.

Movassaghi, S., Abolhasan, M., Lipman, J., Smith, D., and Jamalipour, A. (2014). Wireless body area networks: A survey. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 16(3):1658–1686.

Rashwand, S. and Misic, J. V. (2015). Bridging between IEEE 802.15. 6 and IEEE 802.11 e for wireless healthcare networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Netw.*, 26(1-4):303–337.

Rikkert, M. G. O., Dakos, V., Buchman, T. G., de Boer, R., Glass, L., Cramer, A. O., Levin, S., van Nes, E., Sugihara, G., and Ferrari, M. D. (2016). Slowing down of recovery as generic risk marker for acute severity transitions in chronic diseases. *Critical Care Med.*, 44(3):601–606.

Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E. H., Rietkerk, M., and Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260):53–59.

Silva, R., Achir, N., Santos, A., and Nogueira, M. (2016). Avoiding collisions by time slot reduction supporting voice and video in 802.11 networks. In *IEEE GLOBECOM*, pages 1–6.

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. *Proc. National Academy Sci.*, 111(1):87–92.