

# LATOR: Protocolo de Roteamento Ciente de Qualidade com Prevenção de Aquecimento para Redes Corporais sem Fio

Egberto Caballero, Vinicius C. Ferreira, Robson Lima,  
Célio Albuquerque, Débora C. Muchaluat-Saade

Laboratório MídiaCom, Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF)  
Niterói – RJ – Brasil

{egbertocr, vinicius, robsonal, celio, debora}@midia.com.uff.br

**Abstract.** *This paper presents the Link-Quality Aware and Thermal Aware On-Demand Routing (LATOR) protocol, a proposal for routing in Wireless Body Area Networks (WBAN). LATOR improves Packet Delivery Rate (PDR) in intra-WBAN communication with node overheating prevention. This protocol has the potential to avoid overheating considering only each node's temperature without exchanging temperature information between neighboring nodes; which allows a decrease in control traffic. LATOR considers route selection based on link quality. Initially the Received Signal Strength Indicator (RSSI) was considered as link quality metric. The proposal was implemented and evaluated using the Castalia framework. Experimental results show that the presented proposal allows better performance in the packet delivery rate, when the direct communication presents low quality and there is some other alternative way with better quality compared to the direct route. At the same time, overheating on the network are avoided and maintaining adequate performance in PDR. LATOR increases end-to-end latency; however, it is considered a viable alternative for WBANs applications.*

**Resumo.** *No presente artigo, é apresentado o protocolo LATOR como proposta para o roteamento em Redes Corporais Sem Fio (WBAN). O LATOR aumenta Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) na comunicação intra-WBAN com prevenção do super-aquecimento dos nós. Este protocolo tem a vantagem de evitar o super-aquecimento dos nós, considerando unicamente a própria temperatura do nó; sem trocar informação de temperatura entre nós vizinhos; o que permite uma diminuição no tráfego de pacotes de controle. LATOR considera a seleção de rotas com base na informação de qualidade dos enlaces. Inicialmente se considerou como métrica de qualidade do enlace o Indicador de Força do Sinal Recebido (RSSI). A proposta foi implementada e avaliada utilizando o framework Castalia. Resultados experimentais mostram que a proposta apresentada permite um melhor desempenho na taxa de entrega de pacotes quando a comunicação direta apresenta baixa qualidade e existe algum outro caminho alternativo com melhor qualidade comparado com a rota direta. Ao mesmo tempo se evita o super-aquecimento dos nós na rede e mantendo um adequado desempenho no PDR. LATOR aumenta a latência fim-a-fim; porém, é considerado uma alternativa viável para aplicações WBANs.*

## 1. Introdução

Estudos demográficos têm demonstrado um aumento da população idosa mundial ao longo do presente século. Em paralelo ao envelhecimento da população, aumentam-se os gastos relacionados à saúde e a necessidade de tratá-la de forma preventiva. Essa situação, junto com o desenvolvimento alcançado nos últimos anos na microeletrônica e nas telecomunicações, motivou a criação de novas tecnologias, capazes de promover a saúde, diagnosticar e tratar doenças. Neste contexto, as Redes Corporais Sem Fio (WBAN) podem desempenhar um papel fundamental.

Uma WBAN consiste em pequenos dispositivos alocados sobre a pele ou implantados no corpo que são capazes de trocar dados usando a comunicação sem fio. Esses dispositivos podem ser nós sensores ou atuadores que interagem com um nó coordenador. O nó coordenador atua como agregador das informações coletadas pelos nós sensores, além de enviar comandos para os nós atuadores. Esses dispositivos podem fornecer monitoramento da saúde em tempo real de um paciente. No entanto, desafios devem ser enfrentados para permitir sua adoção prática [Cavallari and Martelli 2014]. Alguns desses desafios são: movimentos posturais, aquecimento dos nós, consumo energético, ambiente heterogêneo, recursos escassos e provisão de qualidade de serviço (QoS).

Como resultado dos trabalhos desenvolvidos com foco em WBAN, no ano 2012 foi publicado o padrão WBAN [Group et al. 2012], onde se definem, além de questões gerais, funcionalidades e características das camadas Física (PHY) e de Controle de Acesso ao Meio (MAC). Porém, aspectos relativos aos protocolos de roteamento não são abordados nesse padrão. Isso deixou o caminho livre para pesquisadores desenvolverem protocolos tentando sempre superar os desafios identificados.

No padrão se define o uso de topologia em estrela com comunicação direta entre os nós sensores e o nó coordenador, ou utilizando uma topologia de estrela estendida, usando no máximo dois saltos. Propostas mais recentes que consideram as especificações do padrão estão focadas em escolher um nó retransmissor. Como exemplo, citam-se os protocolos *Two-Hop* e LAEEBA abordados em [Bhanumathi and Sangeetha 2017]; nos quais o nó intermediário é escolhido com base na energia residual. Já o protocolo *Relay Based* [Javaid and Ahmad 2015] propõe um esquema que utiliza um retransmissor alocado na roupa dos pacientes. Esse nó retransmissor, por estar fora do corpo, poderia transmitir para o nó coordenador com menos restrições que um nó implantado.

Em [Ferreira et al. 2018] se mostrou que em cenários WBAN, nem sempre o caminho direto apresenta a melhor qualidade e que o uso de uma métrica de qualidade na seleção de rotas poderia melhorar o desempenho do PDR. Além disso, pode existir mais de um caminho disponível, nesse caso a seleção do caminho deve garantir o melhor desempenho na rede. Entretanto, na literatura não foi encontrada uma proposta para superar desafios como particionamento topológico e perdas de caminho baseada na qualidade do enlace, em um cenário de comunicação intra-WBAN. Por outro lado, no trabalho apresentado em [Zang and Li 2017], resultados experimentais mostram que existe uma relação direta entre o RSSI e a mobilidade do corpo humano.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um protocolo de roteamento para WBAN baseado na qualidade dos enlaces e com prevenção de super-aquecimento dos nós. Este protocolo é denominado LATOR (*Link-Quality Aware and Thermal Aware On-*

*Demand Routing*). Esse protocolo consiste em um roteamento sob demanda, que explora a qualidade dos enlaces e a utiliza como métrica para a escolha das rotas. Para evitar o super-aquecimento, se considera o calor gerado pela radiação das antenas e a potência dissipada pelos componentes eletrônicos dos nós.

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma. A Seção 2 apresenta uma revisão das propostas para o roteamento em WBAN. Na Seção 3 é apresentada uma descrição detalhada do protocolo LATOR. A Seção 4 exibe uma avaliação da proposta através de simulações e a Seção 5 contém as conclusões e as próximas etapas a serem desenvolvidas.

## 2. Trabalhos Relacionados

Na última década, foram desenvolvidos um número considerável de protocolos de roteamento para WBAN. Na literatura, esses são categorizados como: algoritmos de roteamento baseados em cluster, baseados em QoS, baseados na temperatura, baseados em movimentos corporais e protocolos *cross-layered*.

Os protocolos de roteamento baseados em cluster agrupam os nós da rede em clusters, onde um nó chamado Cabeça de Cluster (CH), tem a missão de encaminhar os dados de seus sensores para o nó coordenador. A transmissão pode ser direta desde o nó CH até o nó coordenador ou através de outros nós CH. Estes protocolos visam minimizar o número de transmissões diretas de nós sensores para o nó coordenador. Foram propostos entre 2004 e 2007, antes da publicação do padrão WBAN, provavelmente por isso, não consideram as topologias indicadas no padrão. Estão focados principalmente em melhorar a eficiência energética sem atender outros desafios de WBAN. Tem desvantagens como a sobrecarga de pacotes de controle e atrasos exigidos para a seleção de clusters. Por isso é considerado que estes protocolos não são os mais convenientes para serem utilizados nas WBANs [Movassaghi et al. 2013].

Os protocolos baseados em QoS fornecem módulos separados para diferentes métricas de QoS que operam de maneira coordenada. Eles fornecem maior confiabilidade, menor atraso fim-a-fim e maior PDR. Métricas como energia e temperatura também são consideradas para tentar considerar vários desafios em uma mesma proposta. Porém, estas propostas não consideram o movimento do corpo. O protocolo DMQoS [Razaque et al. 2011] foi apresentado como o primeiro projeto completo de um protocolo de roteamento multi-objetivo centrado em QoS para WBAN. Outros exemplos, abordados em [Bhanumathi and Sangeetha 2017] são os protocolos TLQoS e EPR. Esses protocolos sofrem principalmente de alta complexidade devido aos vários módulos e diferentes métricas de QoS que possuem e operam simultaneamente.

Os protocolos baseados em temperatura foram projetados com o objetivo principal de minimizar o aumento da temperatura. A ideia desses protocolos é encaminhar dados utilizando diferentes rotas para evitar um aumento dramático da temperatura em alguns nós. O primeiro protocolo que introduziu a temperatura como métrica de roteamento foi TARA [Tang and Tummala 2005]. Propostas posteriores como LTR, ALTR e HPR abordadas em [Bhanumathi and Sangeetha 2017] foram projetadas para melhorar o TARA. O  $M^2E^2$  [Rafatkhanh and Lighvan 2014] também oferece bons resultados frente aos desafios de WBAN. Esses protocolos não incluem métricas de qualidade de rede. Atualmente esta abordagem está presente apenas de forma combinada com outras.

Características de WBAN como baixa potência de transmissão para evitar o aquecimento e poupar energia, unido ao movimento do corpo humano, criam um cenário onde podem acontecer perdas dos enlaces e mudanças temporais na topologia da rede. Os protocolos baseados em movimentos corporais tentam enfrentar esses problemas. Entre eles os dois com melhor desempenho são o protocolo de roteamento oportunista (*Opportunistic routing*) e o protocolo ETPA [Movassaghi et al. 2013]. Geralmente essas propostas utilizam modelos probabilísticos para estimar a ocorrência de perda do enlace pelo movimento do corpo.

Os protocolos de roteamento *cross-layered* abordam e tentam resolver os desafios das camadas de rede e MAC ao mesmo tempo para melhorar o desempenho geral da rede WBAN. Esses protocolos têm alta produtividade, baixo consumo de energia e um atraso fim-a-fim relativamente fixo, como por exemplo, os protocolos CICADA e TICOSS também analisados em [Bhanumathi and Sangeetha 2017]. Porém, não podem fornecer alto desempenho em casos de movimento do corpo e altas perdas de propagação em alguns cenários [Movassaghi et al. 2013]. Esses protocolos foram propostos entre 2006 e 2009 e não se ajustam ao padrão WBAN.

No estudo bibliográfico realizado, não foi encontrado um protocolo de roteamento que execute a escolha de nós retransmissores com base na qualidade dos enlaces, para um cenário de comunicação intra-WBAN. Em propostas como os protocolos *Two-Hop* e LAEEBA, o nó intermediário é escolhido com base na energia residual. No presente trabalho, é proposto um mecanismo de roteamento para enfrentar perdas de caminho com base na qualidade do enlace. Além disso, enfrentam-se desafios como particionamento topológico e aquecimento dos nós.

### **3. Protocolo LATOR**

O protocolo LATOR visa melhorar o PDR quando a comunicação direta entre nós sensores e o nó coordenador tem baixa qualidade, além de evitar o super-aquecimento dos nós. A proposta é projetada considerando duas informações principais: a informação de qualidade dos enlaces que formam a rota e a temperatura dos nós. Baseado na qualidade dos enlaces pretende-se melhorar o PDR, enquanto a temperatura é considerada para evitar o super-aquecimento.

LATOR utiliza a abordagem reativa para evitar muito tráfego de controle. É inspirado no protocolo AODV [Perkins et al. 2003] e executa uma fase de descoberta de rota e uma de manutenção. Na fase de descoberta, são trocadas mensagens de Pedido de Rota (RREQ) e Resposta de Rota (RREP). Na fase de manutenção de rota, são trocadas mensagens Erro de Rota (RERR) e HELLO, cujo principal objetivo é notificar aos nós sensores da quebra do enlace ou do aquecimento. Uma vez executada a descoberta de rota com sucesso, mensagens de dados (DATA) podem ser encaminhadas para o nó coordenador. A ideia geral da proposta consiste em coletar Informação da Qualidade dos Enlaces (LQI) durante a descoberta de rota. Depois os nós sensores usarão métricas baseadas no LQI para o encaminhamento dos dados. Simultaneamente cada nó verifica sua temperatura para tomar ações com o fim de evitar o super-aquecimento.

A informação de qualidade que interessa a esta proposta é no sentido da comunicação sensor-coordenador (*upstream*). Pois nesse sentido, os nós sensores enviam os dados das medições para o nó coordenador. Por outro lado, é necessário que o nó sensor tenha

conhecimento do LQI de cada salto que compõe cada rota até o nó coordenador. Então, são necessários campos específicos para salvá-la na Tabela de Rota (RT) e transportá-la nas mensagens. Na mensagem RREP, um campo RREP\_LQI\_List transporta a lista de LQI dos enlaces, quando se transmite para o nó sensor fonte. Na entrada da RT, o campo RT\_LQI\_List armazena a informação de qualidade dos enlaces; podendo conter a lista de LQI até o nó coordenador ou o LQI do enlace do próximo salto no caminho reverso até o nó fonte, dependendo do tipo de mensagem que criou ou atualizou a entrada na RT.

A prevenção do aquecimento se baseia no controle de atividade do nó, em relação ao aumento da temperatura que experimenta o nó como causa da sua atividade. Cada nó mede sua própria temperatura, que é comparada com um máximo valor de temperatura permitido a partir do qual considera-se que o nó está aquecido. Então, um nó nesse estado não realiza nenhuma transmissão e entra em um estado de baixo consumo onde se descarta toda mensagem RREQ, RREP ou DATA recebida; as mensagens HELLO são processadas; quando são recebidas as mensagens RERR, as entradas afetadas são desativadas na RT.

Quando um nó sensor quer enviar para o nó coordenador uma mensagem DATA recebida da sua camada de aplicação, se não está aquecido o pacote DATA é processado. Caso contrário, é armazenado em um buffer até que sua temperatura alcance um valor abaixo do limiar definido. Se um nó intermediário entra no estado aquecido, envia uma mensagem RERR para todos os nós precursores de suas entradas na RT; notificando de uma falha na rota. O RERR não especifica se a falha é causada pela quebra de um enlace ou pelo aquecimento de um nó. Mas é suficiente para que os nós precursores, entre eles o nó sensor fonte, desativem as entradas na sua RT que tem como próximo salto o nó aquecido que enviou a mensagem RERR.

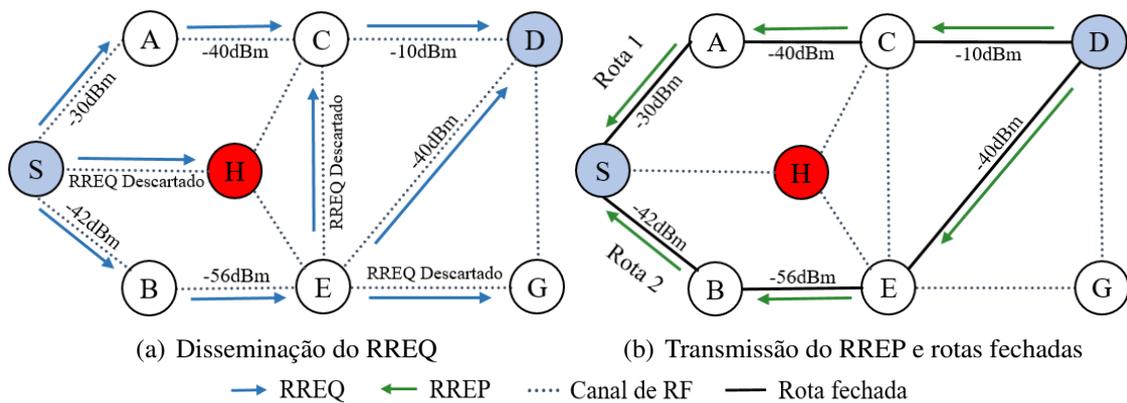
### 3.1. Descoberta de Rota do Protocolo LATOR

A descoberta de rota no LATOR é ilustrada na Figura 1. Esta fase é ativada quando um nó sensor fonte (S) precisa enviar algum dado para o nó coordenador (D) e não tem uma rota disponível na sua RT. Logo depois do nó fonte criar uma mensagem RREQ, ela é transmitida em *broadcast* pela rede. A Figura 1(a) mostra a disseminação do RREQ pela rede. Uma vez que as mensagens RREQs são descartadas pelo nó aquecido, ele não participa da descoberta de rota que está em execução. Dessa forma, é escolhida uma rota que não tem nenhum nó aquecido. Por exemplo, o nó H da Figura 1(a) descarta o RREQ recebido porque está aquecido.

Para evitar *loops* na rede, cada nó sensor, que recebe o RREQ verifica se ele já tinha recebido e processado anteriormente alguma mensagem RREQ com o mesmo identificador de RREQ (RREQ\_ID) e o mesmo endereço de origem (RREQ\_Orig\_Add). Se foi anteriormente recebido, o pacote é descartado, conforme ocorre com o nó C da Figura 1(a). Caso contrário, se o nó que recebe o RREQ não é o destino e não tem disponível na sua RT uma entrada válida para o nó coordenador, ele retransmite o RREQ em *broadcast*. Se o nó que recebe o RREQ é o nó coordenador ou é um nó que tem armazenado na sua RT uma entrada válida para o coordenador com Número de Sequência de Destino (DSN) maior ou igual ao DSN contido no pacote RREQ, o nó responde com uma mensagem RREP.

LATOR considera um número máximo de saltos para uma rota. Na mensagem

RREQ um campo contador de saltos é incrementado em um sempre que é recebido. Quando um nó sensor recebe um RREQ primeiramente incrementa o contador de saltos. Se após ser incrementado, seu valor é menor que o número de saltos máximo permitidos se continua com o processamento da mensagem; caso contrario é descartado. Se o nó sensor que recebeu o RREQ tem na sua RT uma rota ativa para o nó coordenador, só vai responder à solicitude se a soma do contador de salto no RREQ e o numero de saltos da rota na RT é menor ou igual que número máximo de saltos permitidos. Por exemplo na Figura 1(a), onde considera-se que cada rota vai ter no máximo três saltos, o nó G descarta o RREQ recebido, porque o contador de saltos atingiu o máximo valor permitido.



**Figura 1. Processo de descoberta de rota de LATOR.**

A coleta do LQI é realizada durante a disseminação do RREQ pela rede. Por exemplo no caminho S-A-C-D apresentado na Figura 1(a), o nó A recebe o RREQ transmitido pelo nó S, ele cria uma entrada em sua RT para o nó S e armazena o LQI do enlace S-A (-30 dBm). Depois disso, o nó transmite o RREQ em *broadcast*, que é recebido pelo nó C. Essas etapas são repetidas até que o RREQ atinja o nó coordenador D, que responde a solicitação com um RREP.

Em LATOR, o nó coordenador responde todos os RREQ que chegam até ele por diferentes caminhos, incluindo os duplicados de uma mesma solicitação de rota. Como se pode ver na Figura 1(b), o RREQ enviado pelo nó S alcançou o nó D por dois caminhos diferentes, então duas respostas são geradas e enviadas em *unicast* para o nó S pelo caminho reverso. Enquanto o RREP percorre o caminho reverso até o nó sensor fonte, cada nó intermediário cria uma nova entrada para o nó coordenador indicando a lista de LQI da rota recebida no RREP. Logo, essa lista de LQI é atualizada adicionando o LQI que foi armazenado anteriormente na RT durante o processamento do RREQ e logo depois é enviada para o próximo salto no caminho reverso.

Por exemplo, na transmissão do RREP pelo caminho reverso correspondente à rota S-A-C-D, mostrada na Figura 1(b), o nó C recebe um RREP enviado pelo nó D com a lista de LQI (-10dBm) correspondente ao enlace C-D. O nó C cria uma nova entrada na RT para o coordenador indicando a lista de LQI recebida no RREP (-10dBm). A lista de LQI é atualizada com o valor de LQI do seguinte salto no caminho reverso (-40dBm). Depois disso, o RREP é transmitido para o próximo salto, transportando a lista de LQI (-40dBm, -10dBm). Esse processo é repetido até que o RREP atinja o nó sensor que gerou a solicitação. Dessa forma o nó S recebe a lista de LQI (-30dBm, -40dBm, -10dBm) com

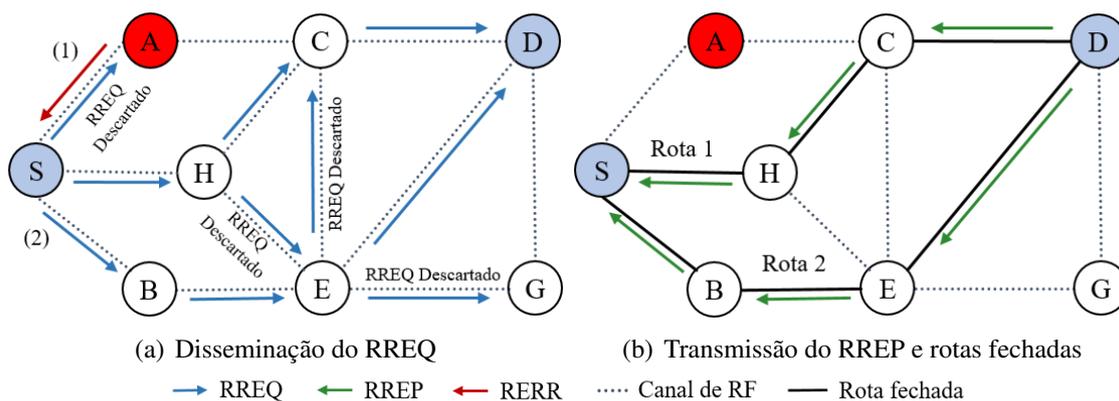
a informação de qualidade dos enlaces S-A, A-C e C-D. De forma similar pelo caminho S-B-E-D, é transmitido outro RREP à mesma solicitação. Dessa forma, o nó S tem dois caminhos possíveis para transmitir para o nó coordenador.

Na descoberta de rota, o nó sensor fonte deve esperar um tempo  $T_D$  suficiente para receber todas as respostas enviadas pelo nó coordenador à mesma solicitude recebida. Enquanto a descoberta de rota está em execução, todos os dados recebidos da camada de aplicação são alocados em um buffer de dados e só poderão ser enviados para o nó coordenador se uma rota é estabelecida em até duas tentativas de descoberta de rota.

### 3.2. Manutenção de Rota e Reroteamento

Para conhecer sobre a conectividade local dos nós vizinhos, cada nó que forma parte de uma rota ativa envia periodicamente por difusão mensagens HELLO com sua identidade e indicando o tempo de vida de um salto. Se ao menos duas mensagens HELLO consecutivas não são recebidas, considera-se que há quebra do enlace. Neste caso, é preciso informar ao nó sensor fonte da quebra do enlace. Também todos os nós que dependem da rota falha são informados.

O nó que detecta uma quebra de enlace notifica a todos os nós afetados, enviando uma mensagem RERR para os nós precursores dessa rota. De forma similar, quando um nó intermediário alcança o estado de aquecimento envia uma mensagem RERR. Mas nesse caso o RERR é enviado para os precursores de todas as entradas na RT do nó aquecido. Quando um nó recebe um RERR desativa na sua RT as entradas que têm como próximo salto o nó do qual recebeu o RERR. Então se não é o nó sensor fonte, ele encaminha o pacote RERR para todos os seus precursores. Esse procedimento garante que o nó origem conheça a falha na rota. A mensagem RERR não especifica se a falha é causada pela quebra de um enlace ou pelo aquecimento de um nó, mas é suficiente para que os nós precursores desativem as rotas que contêm o nó que gerou a falha.



**Figura 2. Reroteamento por aquecimento.**

A Figura 2 mostra o reroteamento na rede provocado pelo aquecimento do nó A. Supondo que das duas rotas encontradas na descoberta supracitada foi escolhida a rota S-A-C-D; na Figura 2(a) se representa o caso onde o nó A chega ao estado de aquecimento. Então primeiramente (1) o nó A envia um RERR para seu nó precursor S. O nó S o recebe e desativa a entrada correspondente à rota S-A-C-D. Logo depois ele executa uma nova descoberta de rota (2). Como o nó A está aquecido, ele descarta o RREQ recebido. No

resto da rede a nova descoberta de rota é realizada segundo foi apresentada na Seção 3.1. Na Figura 2(b) pode se observar que dois novas rotas foram encontradas, das quais o nó aquecido não forma parte. Dessa forma este procedimento evita o super-aquecimento.

### 3.3. Critérios para a Seleção de Rotas

Na seleção da rota até o nó coordenador, a melhor rota é aquela que tenha todos os saltos com boa qualidade, mas isso nem sempre acontece. Pode existir um caminho de boa qualidade onde um único salto seja o suficientemente ruim como para causar grandes perdas de pacotes. Por isso é importante além do valor da informação de qualidade do enlace para cada salto, considerar a variabilidade desses valores. Para decidir qual caminho escolher em função do LQI foram analisadas três possíveis variantes:

1. Rota com o maior LQI mínimo. Este método determina o menor LQI para cada rota disponível até o destino. Esses valores são guardados temporariamente em uma lista, e deles é selecionado o maior LQI. Dessa forma é selecionado o maior LQI mínimo. Depois a rota que corresponde ao maior LQI mínimo é escolhida para o encaminhamento dos dados.
2. Rota com o menor coeficiente de variação. Para cada rota disponível até o destino, o coeficiente de variação do LQI é determinado. Depois é selecionada a rota que tem menor coeficiente de variação do LQI.
3. Rota com a maior média de LQI. Com esta variante se determina o valor médio dos valores de LQI das rotas válidas para o destino. Então a rota que tem maior média de LQI é selecionada.

## 4. Avaliação do LATOR

Em uma WBAN com topologia em estrela e comunicação de um salto, os dados são enviados diretamente para o nó coordenador. Nesse cenário pode acontecer que, quando é enviado um pacote para o nó coordenador, o enlace direto não esteja disponível por causa da postura do corpo, provocando a perda do pacote transmitido. Por outro lado, é possível que outro caminho esteja disponível nesse instante. Na avaliação deste trabalho se utiliza um mecanismo reativo para encontrar a primeira rota disponível no momento de transmissão. Este basicamente envia por *broadcast* uma solicitação de rota para o nó coordenador, o qual a responde em *unicast* pelo caminho em que recebeu a solicitação. Esse mecanismo não considera métricas de qualidade dos enlaces sem fio e o nó coordenador só responde a primeira solicitação recebida.

Na bibliografia não foi encontrada uma proposta de roteamento relacionada para o cenário Intra-WBAN utilizado neste trabalho. No entanto, para a avaliação da proposta, foram considerados: (1) o uso da comunicação direta, recomendado no padrão IEEE 802.15.6 (WBAN) e (2) o protocolo “primeira rota” que modela o protocolo reativo AODV, e (3) o protocolo LAOR (Link-Quality Aware On-Demand Routing). LAOR também é um mecanismo reativo e realiza a descoberta e escolha de rotas considerando a informação de qualidade dos enlaces de forma similar ao protocolo LATOR. A variante LAOR não considera o controle do aquecimento dos nós. Unicamente foi projetado para enfrentar as quebras dos enlaces causadas pelo movimento do corpo e melhorar o PDR considerando o LQI na seleção das rotas.

As simulações e implementação foram realizadas usando o *framework* Castalia [Boulis 2011]; um simulador de código aberto amplamente utilizado para WBAN. As

simulações estão direcionadas em avaliar: a seleção de caminho com base no LQI e o modelo de temperatura. As métricas observadas foram taxa de entrega de pacotes, a latência da comunicação e aumento da temperatura.

#### 4.1. Cenário

A topologia de rede corporal sem fio considerada é composta por um nó coordenador posicionado no lado direito da cintura (nó 0 receptor) e cinco nós sensores, um em cada pulso, um em cada pé e um localizado na região do peito (nós 1 a 5 transmissores). Foi utilizada uma taxa de dados de 5 pacotes por segundo (PPS) e uma carga de dados constante de 120 bytes. Essas configurações são válidas para sensores médicos de baixa taxa de transmissão, como temperatura, umidade, pressão arterial e saturação de oxigênio [Lai and Liu 2013]. A potência de saída do rádio para os nós sensores foi mantida em -20 dBm e para o nó coordenador em -10 dBm. Uma potência de transmissão mais alta para o nó coordenador permite que todos os nós sensores recebam beacons da camada MAC. Uma vez que se considera que um coordenador é um dispositivo não implantado, tem menos restrição de energia. A taxa máxima de transmissão do rádio foi definida em 1024 kbps. A simulação foi realizada vinte vezes para todos os nós e os resultados mostrados são para o intervalo de confiança de 95%. O tempo de simulação foi de 10 mil segundos.

Os aspectos mais importantes do canal sem fio a ser definido são a perda de propagação e a variação temporal. Para fornecer uma estimativa do comportamento do canal em correspondência com um cenário real, se utiliza um mapa de perda e um modelo de variação temporal com base em uma função de densidade de probabilidade. Ambos produzidos a partir de medidas experimentais e considerando a mobilidade do corpo [Smith and Miniutti 2010]. As configurações de camada física e MAC utilizadas foram as descritas no padrão WBAN [Group et al. 2012].

Tanto para LAOR quanto para o protocolo LATOR, o tempo de descoberta de rota foi definido de forma empírica em 800 milissegundos. O número máximo de saltos permitidos é definido em dois saltos. Dessa forma, buscam-se todos os caminhos de dois saltos disponíveis para alcançar o nó coordenador, seguindo as especificações do padrão WBAN. O RSSI foi considerado como indicador de qualidade do enlace, mas outros indicadores de qualidade podem ser usados, por exemplo a relação sinal-ruído (SNR). Para o protocolo LATOR foi utilizado como métrica de seleção de rotas o maior RSSI mínimo, porque após simulações utilizando as três variantes listadas na Seção 3.3, o maior RSSI mínimo apresenta os melhores resultados do PDR na comunicação direta entre os nós que têm a menor qualidade de enlace.

#### 4.2. Estimação do Aumento de Temperatura

Para modelar o comportamento da temperatura, foi utilizada a forma discretizada da equação de transferência de bio-calor de Pennes [Tang and Tummala 2005]. Nesse cenário, consideram-se como fontes de calor a Taxa de Absorção Específica (SAR) gerada pela radiação das antenas e a potência dissipada pelos componentes eletrônicos dos nós. A forma discretizada se apresenta na Equação 1, onde  $T^{m+1}(i, j)$  é a temperatura da grade  $(i, j)$  no tempo  $m + 1$ ,  $\delta_t$  é um intervalo de tempo discretizado e  $\delta$  é o passo espacial discretizado, ou seja, o tamanho da grade. Dessa forma, a Equação 1 permite estimar a temperatura de cada ponto em cada instante de tempo, em função da temperatura do instante de tempo anterior.  $\rho$  é a densidade do tecido,  $C_p$  é o calor específico do tecido,

$K$  é a condutividade térmica do tecido,  $b$  é a constante de perfusão do sangue e  $T_b$  é a temperatura do sangue,  $SAR$  é o calor gerado pela radiação da antena e  $P_c$  indica o calor resultante da dissipação de potência do nó.

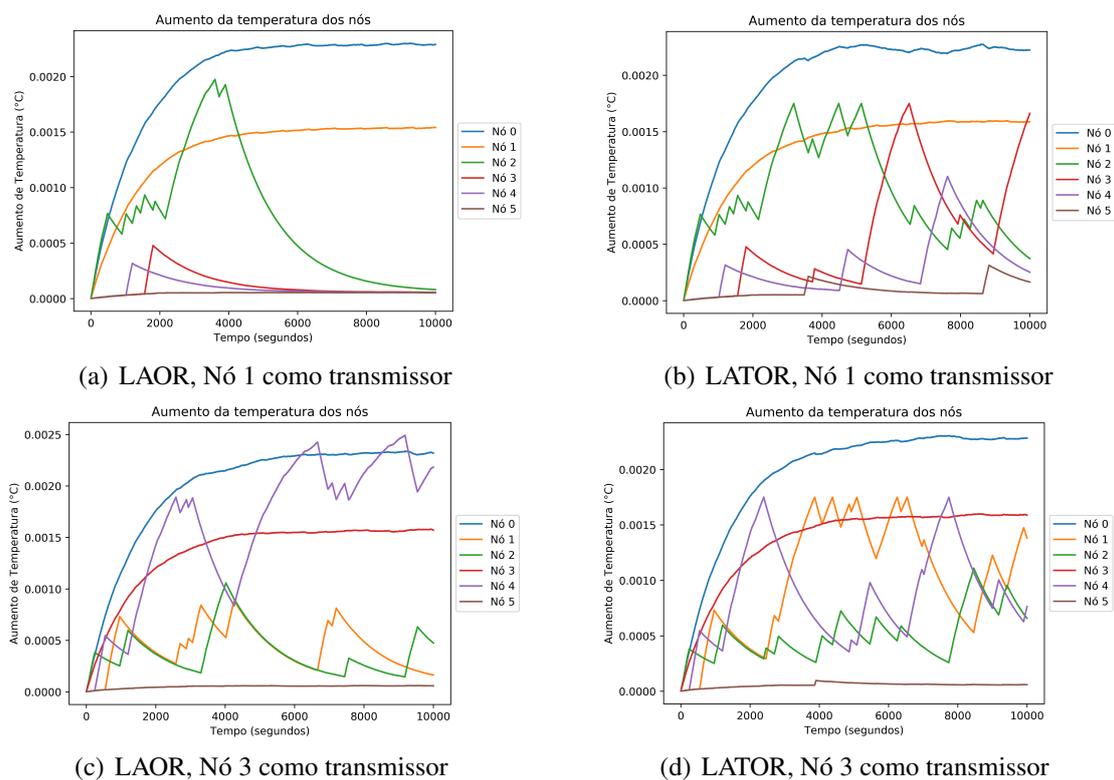
$$T^{m+1}(i, j) = \left[ 1 - \frac{\delta_t b}{\rho C_p} - \frac{4\delta_t K}{\rho C_p \delta^2} \right] T^m(i, j) + \frac{\delta_t}{C_p} SAR + \frac{\delta_t b}{\rho C_p} T_b + \frac{\delta}{\rho C_p} P_c + \frac{\delta_t K}{\rho C_p \delta^2} [T^m(i+1, j) + T^m(i, j+1) + T^m(i-1, j) + T^m(i, j-1)] \quad (1)$$

Nesse cenário foi considerada a atividade dos nós tomando como referência um intervalo de tempo discretizado de um milissegundo. Como passo espacial se definiu o valor de 0,005 metros. Para simular o modelo de temperatura, foram tomadas como referência características radioelétricas dos transmissores e características elétricas e térmicas do tecido do corpo humano consideradas em [Tang and Tummala 2005], para as quais resulta um SAR de 0,8402  $W/kg$ . Os valores dos outros parâmetros são: densidade do tecido, 1040  $kg/m^3$ ; calor específico do tecido, 3600  $J/kg^\circ C$ ; condutividade térmica do tecido, 0,498  $J/ms^\circ C$ ; permissividade relativa do tecido, 52,73; condutividade, 1,7388  $S/m$ ; constante de perfusão do sangue, 2700  $J/m^3 s^\circ C$ ; temperatura do sangue, 37  $^\circ C$ ; e corrente da antena, 0,1  $A$ .

### 4.3. Análise dos resultados

Os resultados mostraram que o maior aumento de temperatura causado pelo SAR é de 0,3264 $^\circ C$  e o aumento causado pela potência dissipada alcança um valor máximo de 0,0471 $^\circ C$ . Em [Havenith 2001], é dito que um aumento de temperatura de 0,1 $^\circ C$  é suficiente para ativar respostas termorreguladoras do corpo humano que podem ser prejudiciais a longo tempo. Para evitar que a temperatura ultrapasse esse valor, na proposta definiu-se 0,1 $^\circ C$  como limite máximo permissível para o aquecimento. No cenário descrito em todos os casos a temperatura não atinge esse limite. Então, para analisar o desempenho do método de prevenção do aquecimento proposto, definiu-se um limite do aumento da temperatura de 0,0017 $^\circ C$  nos nós sensores. Espera-se que nos casos onde a temperatura supera esse novo limite definido, deve-se ativar o procedimento de notificação do aquecimento e troca de rota.

Na Figura 3, é apresentado o comportamento da temperatura dos nós 1 e 3 para este cenário. As figuras no lado esquerdo mostram os resultados do protocolo LAOR e no lado direito do protocolo LATOR. Pode-se ver na Figura 3(a) que o nó 2 experimenta um maior aumento na sua temperatura nos primeiros 3800 segundos porque ele na maioria das vezes atua como nó retransmissor do nó 1 na rota 1-2-0. De forma similar, acontece na Figura 3(c) com o nó 4, quando atua como retransmissor do nó 3. Nesses casos, as trocas de rotas se devem às quebras dos enlaces. Para LATOR, pode-se observar na Figura 3(b) que a temperatura do nó 2 começa a aumentar até atingir o limite definido. Esse aumento se deve a que o nó 2 é utilizado mais como retransmissor, pois a rota 1-2-0 é a de melhor qualidade para encaminhar os dados transmitidos pelo nó 1. Como resultado, a temperatura do nó 2 começa a aumentar até atingir o valor limite definido. Esse valor é alcançado pela primeira vez aos 3180 segundos. Nesse instante, o nó 2 envia a notificação do seu aquecimento para o nó transmissor. O nó 1, quando recebe a notificação, troca de rota e começa usar o caminho direto. Nesse momento, o nó 2 começa a esfriar.



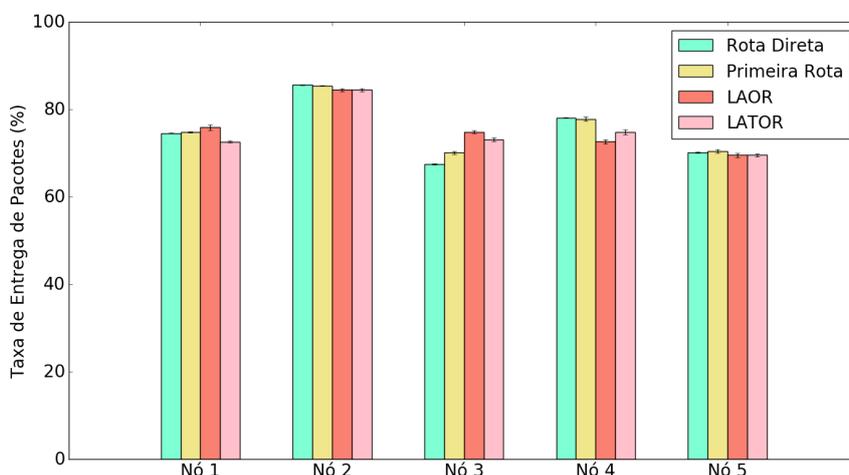
**Figura 3. Comportamento da temperatura dos nós.**

Imediatamente depois, observa-se a existência de mais dois picos onde novamente o nó 2 alcança o limite de temperatura definido. Entre o primeiro e o terceiro pico na temperatura do nó 2 aconteceram trocas de rotas, onde se retomou o uso do nó 2 como retransmissor. Nesses casos, a troca de rota não foi gerada por aquecimento, senão por quebras do enlace enquanto se utilizavam as rotas 1-0, 1-3-0 e 1-4-0. Depois do terceiro pico de temperatura do nó 2, a rota 1-3-0 começa a ser utilizada, até que o nó 3 atinge a máxima temperatura permitida. Nesse caso, é o nó 3 quem ativa o reroteamento para evitar o super-aquecimento.

Quando se analisam os resultados apresentados na Figura 3(d) onde o nó 3 é o transmissor, se pode observar que também acontece o controle de temperatura. Nesse caso ativado a primeira vez pelo nó 4. Pois como se mostra na Figura 3(c), a rota de melhor qualidade na maioria do tempo é a 3-4-0. De acordo com os resultados mostrados na figura, o nó 4 aos 2395 segundos alcança o ponto de aquecimento e a partir desse momento passa a ser mais utilizada a rota 3-1-0, até os 6400 segundos onde se utiliza novamente a rota 3-4-0. Esses resultados mostram que o método proposto para o controle de temperatura funciona corretamente. Mas é importante analisar a influência desse método no desempenho de outros parâmetros como a latência e o PDR.

Na Figura 4 é apresentada uma comparação do PDR considerando a rota direta, a primeira rota, LAOR e LATOR. Para o nó 1 tanto a rota direta quanto a primeira rota têm resultados similares utilizando 100% das vezes o enlace 1-0. Por sua parte o protocolo LAOR utiliza a rota 1-0 o 70,59% das vezes e; melhora o PDR porque passou usar a rota 1-2-0 de melhor qualidade 25,20% das vezes. No entanto, LATOR diminui levemente o

PDR porque quando o nó 2 chega ao estado de aquecimento fica temporariamente inabilitado para atuar como retransmissor, então é usada a rota 1-3-0 27,96% das vezes. Essa rota não supera a qualidade da comunicação direta, mas foi a que estava disponível com melhores valores de RSSI no momento de realizar a descoberta de rota.



**Figura 4. PDR para cada nó transmissor.**

Quando se analisam os resultados do nó 2, o qual tem a melhor qualidade na comunicação direta, 100% das vezes foi utilizada a rota 2-0. Tanto para LAOR quanto LATOR diminui levemente o PDR porque a rota 2-4-0 foi utilizada o 4,12% das vezes. Para o nó 5 o comportamento é similar, sendo utilizada a rota 5-0 100% das vezes na comunicação direta e na primeira rota; para LAOR e LATOR a rota 5-0 é usada 97% das vezes e a rota 5-1-0 3% das vezes. Em ambos casos, as rotas alternativas encontradas têm menor qualidade que a rota direta, mas foram as disponíveis no momento de realizar a descoberta de rota. Também LAOR e LATOR têm os mesmos resultados porque, como se utiliza mais a rota direta, o nó retransmissor não chega ao aquecimento.

Os resultados do nó 3 mostraram que o enlace direto, rota 3-0, tem a qualidade mais baixa de todos os enlaces da rede; o qual favorece a existência de rotas alternativas de melhor qualidade. Utilizando a rota direta, o nó 3 obtém um PDR de 67,53%. Usando a primeira rota encontrada se alcançou um PDR de 70,12%, utilizando a rota 3-1-0 60,57% das vezes e a rota 3-2-0 23,26% das vezes. Tanto LAOR quanto LATOR melhoram o PDR do nó 3, alcançando um PDR de 74,89% e 73,10% respectivamente. LAOR usou a rota 3-1-0 15% das vezes, a rota 3-2-0 16,81% das vezes e a rota 3-4-0, de melhor qualidade, é usada 68,18% das vezes o que favorece o aumento do PDR. LATOR ativa o processo de troca de rota quando o nó 4 está aquecido e, fica temporariamente inabilitado para atuar como retransmissor. Então a rota 3-4-0 só é usada 33,55% das vezes. Por isso o PDR diminuiu comparado com LAOR, mas ainda oferece resultados melhores comparados com a rota direta e a primeira rota.

Para o nó 4, a rota direta e a primeira rota oferecem resultados similares. Com LAOR, a rota 4-3-0 foi usada o 45,61% das vezes; essa foi a rota com melhores valores de RSSI no momento de realizar a descoberta de rota. Porém, no cenário analisado, o enlace 3-0 é o mais afetado pela variação temporal do canal sem fio; por isso o PDR diminuiu comparado com a rota direta. Por sua parte LATOR quando realiza o controle

de temperatura, realiza mais vezes o processo de descoberta de rotas atualizando a tabela de rotas com mais frequência. Nesse caso, a rota 4-3-0 foi usada o 24,95% das vezes, o qual favoreceu o aumento do PDR comparado com LAOR.

A latência fim-a-fim também foi analisada. A Figura 5 mostra o número de pacotes com uma dada latência. Esta figura corresponde ao nó 3, o qual é o nó que mais vezes executa a descoberta de rotas e em consequência é o mais afetado pela latência. Na figura, é visível que quando se utiliza a rota direta há um maior número de pacotes com latência entre os primeiros 100 ms. Para a primeira rota, LAOR e LATOR há um comportamento semelhante, aumentando a latência para alguns pacotes. Com a rota direta 0,8% dos pacotes recebidos têm uma latência maior que 500 ms; com a primeira rota encontrada 1,8%; LAOR 2,02% e LATOR 2,16%. Esse aumento de latência corresponde principalmente à demora do processo de descoberta de rotas. Em compensação, aumenta a quantidade de pacotes que chegam ao nó coordenador.

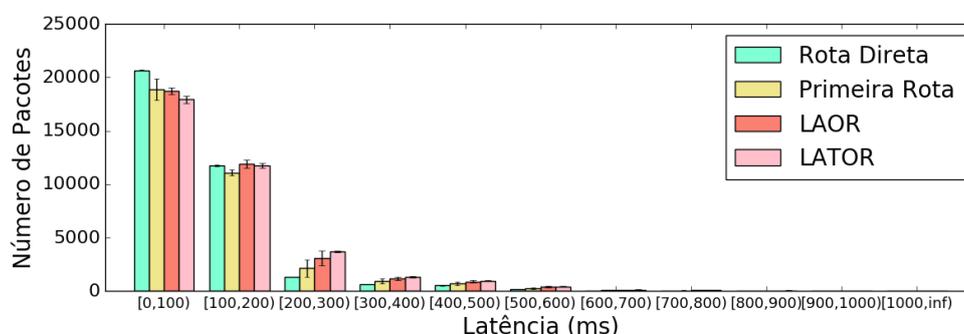


Figura 5. Distribuição da latência dos pacotes.

## 5. Conclusões

Neste trabalho, apresentou-se o protocolo LATOR, que propõe um mecanismo para a seleção de nós retransmissores baseados na qualidades dos enlaces e com prevenção do aquecimento dos nós. A avaliação foi realizada por simulação, utilizando parâmetros experimentais do comportamento do canal sem fio no corpo humano e considerando a mobilidade do corpo humano. Com base nos resultados o protocolo LATOR mostrou ser uma alternativa à tarefa de roteamento em WBAN. Pois permite ter ganhos na PDR quando a rota direta tem baixa qualidade. E ainda permite manter o desempenho da comunicação direta quando a qualidade do enlace é boa. O mecanismo para evitar o super-aquecimento garante que a temperatura não ultrapasse o limite definido e a latência permanece em valores aceitáveis para aplicações WBAN.

No entanto, considera-se que o processo de descoberta de rota deve ser otimizado, para evitar que sejam escolhidas rotas mais afetadas pela variação temporal do canal que a comunicação direta. Nesse sentido, uma opção a considerar é a inclusão de uma fase de configuração inicial para determinar a probabilidade de perdas de pacote em cada rota, e considerá-la como outra métrica na seleção de rotas. Também se considera oportuno avaliar o comportamento do LATOR com outros modelos de mobilidade do corpo ou em um *testbed*. Adicionalmente, considerar e avaliar o consumo energético é um aspecto importante para permitir o maior tempo de vida da bateria dos sensores.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) Grant 2018/23062-5 pelo financiamento para desenvolver as atividades desta pesquisa.

## Referências

- Bhanumathi, V. and Sangeetha, C. (2017). A guide for the selection of routing protocols in wban for healthcare applications. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 7(1):24.
- Boulis, A. (2011). Castalia. a simulator for wireless sensor networks and body area network. *NICTA: National ICT Australia*.
- Cavallari, R. and Martelli, F. (2014). A survey on wireless body area networks: Technologies and design challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3).
- Ferreira, V. C., Muchaluat-Saade, D. C., and de Albuquerque, C. V. (2018). Estudo sobre estabilidade de rotas em redes corporais sem fio. In *ERCAS-RJ 2018*. SBC.
- Group, I. . W. et al. (2012). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks. Standard, IEEE, New York, USA.
- Havenith, G. (2001). Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *Journal of Applied Physiology*, 90(5):1943–1954.
- Javaid, N. and Ahmad, A. (2015). A relay based routing protocol for wireless in-body sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 80(3):1063–1078.
- Lai, X. and Liu, Q. (2013). A survey of body sensor networks. *Sensors*, 13(5):5406–5447.
- Movassaghi, S., Abolhasan, M., and Lipman, J. (2013). A review of routing protocols in wireless body area networks. *Journal of Networks*, 8(3):559–575.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., and Das, S. (2003). Rfc3561: Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing.
- Rafatkah, O. and Lighvan, M. Z. (2014). M2e2: a novel multi-hop routing protocol for wireless body sensor networks. *Int J Comput Netw Commun Secur*, 2(8):260–267.
- Razzaque, M. A., Hong, C. S., and Lee, S. (2011). Data-centric multiobjective qos-aware routing protocol for body sensor networks. *Sensors*, 11(1):917–937.
- Smith, D. and Miniutti, D. (2010). Dynamic narrowband body area communications: Link-margin based performance analysis and second-order temporal statistics. In *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*.
- Tang, Q. and Tummala, N. (2005). Tara: Thermal-aware routing algorithm for implanted sensor networks. In *International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages 206–217. Springer.
- Zang, W. and Li, Y. (2017). Gait-cycle-driven transmission power control scheme for a wireless body area network. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 22(3):697–706.