

FERNANDO HENRIQUE GIELOW

**UM ESTUDO DOS REQUISITOS E  
PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO EM  
REDES DE SENSORES SEM FIO MULTIMÍDIA**

Monografia de Trabalho de Graduação  
apresentada ao Programa de Bacharelado  
em Ciência da Computação, Departamento  
de Informática, Setor de Ciências Exatas,  
Universidade Federal Do Paraná.

Orientador: Prof. Aldri Luiz dos Santos

CURITIBA

2011

FERNANDO HENRIQUE GIELOW

**UM ESTUDO DOS REQUISITOS E  
PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO EM  
REDES DE SENSORES SEM FIO MULTIMÍDIA**

Monografia de Trabalho de Graduação  
apresentada ao Programa de Bacharelado  
em Ciência da Computação, Departamento  
de Informática, Setor de Ciências Exatas,  
Universidade Federal Do Paraná.

Orientador: Prof. Aldri Luiz dos Santos

CURITIBA

2011

## RESUMO

A evolução tecnológica recente permitiu a criação de componentes de *hardware* multimídia baratos, baseados em semicondutores complementares de metal-óxido. A integração destes com dispositivos de comunicação sem fio possibilitou o desenvolvimento de sensores multimídia capazes de realizar a transmissão de fluxos de vídeo e áudio. Em conjunto com a evolução natural das configurações dos dispositivos e das técnicas de processamento de sinais, essa integração deu origem às redes denominadas Redes de Sensores Sem Fio Multimídia (RSSFMs). Desta forma, a melhor capacidade de percepção de eventos através de sensores multimídia permitiu o surgimento e a evolução de diversos tipos de aplicação. A comunicação entre os dispositivos da RSSFM nas camadas de rede e transporte se preocupa com o estabelecimento de rotas, priorização de pacotes, controle de congestionamentos e recuperação de erros. O bom funcionamento destas operações dá suporte ao tráfego multimídia, que é pesado por natureza e exige que suas transmissões satisfaçam os requisitos da aplicação. Esta monografia apresenta inicialmente os fundamentos necessários para o entendimento conceitual das RSSFMs, apontando os seus principais requisitos. Em seguida, são detalhados os trabalhos mais recentes que atuam nas camadas de rede e transporte, tendo como foco o seu uso em RSSFMs. As vantagens e desvantagens de cada um destes protocolos são apresentadas, indicando também as questões a serem tratadas.

Palavras-chave: RSSFM, requisitos, transporte, rede, roteamento.

## ABSTRACT

The recent technological evolution allowed the creation of cheap hardware pieces, based on complementary metal-oxide-semiconductors. The integration of those with devices capable of wireless communication led to the development of multimedia sensors able to perform the transmission of video and audio streams. Furthermore, combined with the natural evolution of the devices' configurations and of the signals processing technologies, this integration created the networks entitled Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs). Thus, the better capability of event description with multimedia sensors allowed the emergence and the evolution of several kinds of applications. The communication among the RSSFM's devices on the network and transport layers has to take into account the creation of routes, prioritization of packets, congestion control and error recovery. The good performance of those operation gives support to the multimedia traffic, which is heavy in its own nature and demands that its transmissions meet the application requirements. This monograph presents initially the needed knowledge for the conceptual understanding of WMSNs, pointing its main requirements. Then, the most recent works that act on the network and transport layers with focus on WMSNs are detailed. The advantages and disadvantages of each one of those protocols are presented, indication issues to be addressed.

Keywords: WMSN, transport, network, routing.

## SUMÁRIO

<b>Resumo</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Características das redes de sensores sem fio . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Estrutura da monografia . . . . .	4
<b>2 Fundamentos</b>	<b>5</b>
2.1 Categorias de roteamento . . . . .	5
2.1.1 Roteamento plano . . . . .	5
2.1.2 Roteamento hierárquico . . . . .	6
2.1.3 Roteamento geográfico . . . . .	7
2.1.4 Roteamento multi-caminhos . . . . .	9
2.2 Operações na camada de transporte . . . . .	10
2.2.1 Detecção e recuperação de erros . . . . .	10
2.2.2 Controle de congestionamento . . . . .	12
2.2.3 Seleção de rotas . . . . .	13
2.3 Redes de sensores sem fio multimídia . . . . .	14
2.3.1 Requisitos . . . . .	15
<b>3 Estudo de trabalhos</b>	<b>18</b>
3.1 Técnicas multimídia na camada de rede . . . . .	18
3.1.1 TGPF . . . . .	18
3.1.2 AGEM . . . . .	19
3.1.3 NAMVD . . . . .	21
3.1.4 Multimedia Aware MMSPEED . . . . .	23
3.1.5 AntSensNet . . . . .	25
3.1.6 Discussão . . . . .	27
3.2 Técnicas multimídia na camada de transporte . . . . .	28

3.2.1	M-DTSN . . . . .	28
3.2.2	MMDR . . . . .	30
3.2.3	QCCP-PS . . . . .	32
3.2.4	ACT . . . . .	33
3.2.5	Discussão . . . . .	35
3.3	Técnicas multimídia com abordagens <i>cross-layer</i> . . . . .	36
3.3.1	MPMP . . . . .	36
3.3.2	RRA . . . . .	37
3.3.3	Discussão . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>40</b>
4.1	Direções para trabalhos futuros . . . . .	41
	<b>Bibliografia</b>	<b>44</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Requisição de um dado e resposta com o dado no roteamento plano . . . . .	5
2.2	Divisão da rede em grupos e roteamento hierárquico . . . . .	6
2.3	Seleção de nó para envio de dados e roteamento geográfico . . . . .	8
2.4	Roteamento multi-caminho e buraco dinâmico . . . . .	9
2.5	Erro no envio de dados e congestionamento na rede . . . . .	10
2.6	Recuperação de dados fim-a-fim e salto-a-salto . . . . .	11
2.7	Controle de congestionamento por ajuste de taxa e caminhos disjuntos . . .	13
2.8	Seleção de rota: prioridade em baixa latência x equilíbrio de energia . . . .	14
2.9	Arquiteturas possíveis para uma RSSFM . . . . .	15
2.10	Redundâncias na captura de um evento . . . . .	16
3.1	Exemplos de interferências/colisões causadas pelos caminhos próximos . . .	19
3.2	Desvio angular utilizado pelo protocolo AGEM . . . . .	20
3.3	Informações sobre as diferenças de imagens salvas nos quadros de vídeo . . .	22
3.4	Roteamento com diferentes velocidades e confiabilidades no MMSPEED . . .	24
3.5	AntSensNet: Envio de agentes FANT e resposta através de agentes BANT . . .	26
3.6	Envio de quadros vs. tempo de renderização para DTSN e M-DTSN . . . . .	30
3.7	Codificação LDPC . . . . .	31
3.8	Cálculo das prioridades do QCCP-PS . . . . .	33
3.9	Arquitetura do protocolo ACT . . . . .	34
3.10	Alocação de rotas para subfluxos prioritário e secundário no MPMP . . . . .	37

## LISTA DE TABELAS

3.1	Tabela comparativa das características dos protocolos de roteamento . . .	28
3.2	Tabela comparativa das características dos protocolos de transporte . . . .	35
3.3	Tabela comparativa das características dos protocolos <i>cross-layer</i> . . . . .	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ACK</b>	ACKnowledgement
<b>ACT</b>	Adaptive Compression-based congestion control Technique
<b>ADPCM</b>	Adaptive Differential Pulse Code Modulation
<b>AGEM</b>	Adaptative Geographic-compass Energy-aware Multipath
<b>AOMDV</b>	Ad-hoc On-demand Multipath Distance Vector
<b>BANT</b>	Backward ANT
<b>CAMS</b>	Context-Aware Multi-path Selection algorithm
<b>CAP</b>	Compressão Adaptativa de Pacotes
<b>CAT</b>	Controle Adaptativo de Taxas
<b>DANT</b>	Data ANT
<b>DTSN</b>	Distributed Transport for Sensor Networks
<b>DWT</b>	Discrete Wavelet Transform
<b>DVC</b>	Distributed Video Coding
<b>FANT</b>	Forward ANT
<b>GdI</b>	Grupos de Imagens
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>LC</b>	Layered Coding
<b>LDPC</b>	Low Density Parity Check
<b>M-DTSN</b>	Multimedia Distributed Transport for Sensor Networks
<b>MA-MMSPEED</b>	Multimedia-Aware Multipath Multi-SPEED
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MANT</b>	Maintenance ANT
<b>MDC</b>	Multiple Description Coding
<b>MMDR</b>	Multipath Multi-stream Distributed Reliable
<b>MMSPEED</b>	Multipath Multi-SPEED
<b>MPMP</b>	Multi-Path Multi-Priority
<b>NACK</b>	Negative ACKnowledgement
<b>NAMVD</b>	Network-Adaptative Multipath Video Delivery
<b>NTR</b>	Não Tempo Real
<b>NVa</b>	Nó Variável
<b>NVe</b>	Nó Verificador
<b>PCTN</b>	Prioridade de Classe de Tráfego
<b>PG</b>	Prioridade Global
<b>PGeo</b>	Prioridade Geográfica
<b>PI</b>	Prioridade Individual
<b>PVC</b>	Predictive Video Coding
<b>PSNR</b>	Peak Signal-to-Noise Ratio
<b>QCCP-PS</b>	Queue based Congestion Control with Priority Support
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RED</b>	Random Early Detection
<b>RLC</b>	Run-Length Coding
<b>RSSF</b>	Rede de Sensores Sem Fio
<b>RSSFM</b>	Rede de Sensores Sem Fio Multimídia
<b>TPGF</b>	Two-Phase geographic Greedy Forwarding
<b>TR</b>	Tempo Real
<b>UAT</b>	Unidade de Ajuste de Transmissão
<b>UCC</b>	Unidade de Controle de Congestionamento
<b>UDC</b>	Unidade de Detecção de Congestionamento
<b>UDS</b>	Unidade de Diferenciação de Serviço
<b>UNC</b>	Unidade de Notificação de Congestionamento
<b>VBANT</b>	Video Backward ANT
<b>VFANT</b>	Video Forward ANT

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) compreendem uma tecnologia emergente que está em crescimento contínuo [4, 36]. Os avanços recentes nos sistemas microeletromecânicos e nas tecnologias de comunicação sem fio permitiram a criação de pequenos dispositivos (nós) cada vez mais baratos e menores, equipados com sensores, microprocessador, memória e rádios. Uma RSSF não estruturada consiste tipicamente de uma quantidade de dezenas até milhares destes dispositivos, espalhados em uma região de interesse. Estes nós são otimizados com relação ao uso de energia e têm a capacidade de captura de dados do meio, de processamento, de armazenamento e de transmissão pelo meio sem fio.

Muitos investimentos têm sido realizados na área das RSSFs, não apenas de natureza acadêmica, como também da indústria. Esse tipo de rede tem ganho espaço em diversos campos de aplicações, como a automação, o controle, a saúde, o militar, o rastreamento, e o monitoramento. Elas têm permitido, entre outras atividades, a automatização de tarefas ordinariamente realizadas por pessoas em um processo puramente mecânico, o controle automático de segurança em processos industriais complexos, o monitoramento remoto de sinais vitais de idosos, a vigilância em campos de combate ou campos vítimas de desastres naturais, o rastreamento de pessoas ou veículos, e o monitoramento contínuo de áreas remotas ou que apresentam sinais de risco. O escopo de aplicações das RSSFs também está em crescimento - na medida que novas tecnologias emergem, novas aplicações se tornam possíveis. Atualmente, os sensores sem fio podem ser aplicados em redes corporais, ou até mesmo em conjunto com equipamento multimídia.

### 1.1 Características das redes de sensores sem fio

Apesar de ideais para diversas aplicações, o uso das RSSFs apresenta restrições [4]. Além das dificuldades herdadas das redes cabeadas, a natureza aberta do meio sem fio exige preocupação maior sobre questões de segurança; colisões dos pacotes são ainda mais difíceis de serem tratadas, a distância de cobertura de uma transmissão é muito menor, e o conceito de interferência surge. Além disso, os nós possuem capacidades limitadas, visto que o poder de processamento é baixo, a memória disponível é muito menor e, o principal, eles têm uma fonte de energia limitada. Estes dispositivos são alimentados por baterias e, uma vez que elas acabam, a vida útil destes nós é encerrada. É inviável, devido à quantidade ou ao ambiente, realizar a manutenção dos nós para a troca de suas baterias. Desta maneira, este tipo de rede exige uma atenção maior com relação à energia gasta no processamento e na transmissão de dados. As RSSFs, de maneira geral, têm as seguintes

características e restrições:

- *Energia finita*: Os nós são geralmente alimentados por baterias. Na maioria dos casos, realizar a coleta dos sensores para subsequente troca das baterias é impraticável, devido à própria natureza das redes.
- *Restrições de processamento e memória*: As restrições de energia e o requisito de terem tamanhos pequenos e serem baratos impossibilitam que os nós tenham capacidade de processamento e quantidade de memória muito elevados.
- *Rede sujeita à falhas*: A exposição dos nós ao meio ambiente e a sua restrição de energia possibilitam que eles abandonem a rede prematuramente, devido à falhas de *hardware* ou falta de energia.
- *Topologia densa*: A distribuição dos nós é, geralmente, feita de maneira aleatória. A ausência de controle nesta fase e a possibilidade de falhas normalmente implicam no uso de uma quantidade elevada de nós, para que a região de interesse seja devidamente coberta.
- *Redundância de dados*: A topologia aleatória da rede tem como consequência a presença de diversos nós que capturarão redundantemente um mesmo evento de interesse.
- *Padrão de tráfego muitos-para-um*: Na maioria das RSSFs alguns nós têm maior importância. É o caso da **estação-base** em aplicações de coleta de dados, que em geral é o destino final de todos os dados coletados em um tráfego com padrão muitos-para-um.
- *Auto-configuração*: Após os nós serem depositados na região de interesse, eles devem se organizar funcionalmente sem o intermédio direto de pessoas.
- *Redes específicas para aplicações*: A aplicação é geralmente especificada e implementada para um único fim. Por isso, os requisitos da rede variam de acordo com a aplicação.

Para a operação de uma RSSF, diversos protocolos devem ser implementados e funcionar de maneira integrada e cooperativa. A pilha de protocolos para as RSSF consiste de cinco camadas [38], em uma abordagem de baixo para cima: física, enlace, rede, transporte e aplicação. A camada **física** é composta pelo *hardware* responsável pelos meios de comunicação, que realizarão as transmissões e os recebimentos no ambiente sem fio. A camada de **enlace** cuida da transmissão direta especificamente entre dois nós vizinhos, se preocupando com as políticas de acesso ao meio, detecção e correção de erros, e controle de fluxo. A camada de **rede** é responsável pelo endereçamento dos nós, e pelo roteamento de

dados de uma origem até um destino através de vários saltos. A camada de **transporte** é responsável pelo controle de congestionamento da rede, e pela confiabilidade dos dados enviados. Por fim, a camada de **aplicação** é responsável por prover serviços e protocolos às aplicações, de maneira que as demais camadas sejam abstraídas.

Em qualquer sistema distribuído, a comunicação efetiva entre os nós é fundamental. Abstraindo as camadas física e de enlace, que se preocupam e garantem a troca de *bits* e quadros, a comunicação entre os nós da rede como um todo ocorre nas camadas de rede e transporte, se preocupando com o estabelecimento de rotas, controle de congestionamentos e recuperação de erros. Desta maneira, o foco desta monografia é dado à comunicação nas camadas de rede e de transporte.

O roteamento [5] dos dados a partir de uma origem até um destino, através de vários saltos, é tarefa da camada de rede. No estabelecimento destas rotas, diversas métricas podem ser utilizadas, dependendo das necessidades da aplicação. Algumas métricas compreendem rota com a maior soma de energia residual, rota de menor consumo de energia, rota com menor número de saltos, rota com maior energia residual mínima entre os nós [4]. Várias técnicas têm sido empregadas na camada de roteamento, a fim de otimizar algum aspecto da rede, como diminuir o consumo de energia ou de aumentar a taxa de entrega dos dados.

A camada de transporte [25, 33] é responsável pela entrega confiável dos dados do nó origem ao nó destino, podendo verificar e talvez corrigir erros provenientes das condições do canal utilizado para a comunicação. Outra tarefa importante nesta camada é o controle de congestionamento, que tem a função de evitar que a rede opere com tráfegos de dados mais pesados do que o tolerável, que levam ao estouro de filas e à não-entrega de dados. Em geral, a operação de controle consiste nas fases de detecção de congestionamento, notificação das origens, e na conseqüente medida a ser tomada pelos nós origens. Indo mais além, a camada de transporte pode ser utilizada para calibrar alguns parâmetros da camada de rede.

A integração recente de tecnologias de comunicação sem fio com peças de *hardware* barato, como microfones e câmeras baseadas em semicondutores complementares de metal-óxido, possibilitou o desenvolvimento de nós que são capazes de realizar a transmissão de fluxos de vídeo e áudio. A combinação disso com a evolução natural das capacidades de processamento e armazenamento dos nós e das técnicas de processamento de sinais permitiu o surgimento de um novo tipo de rede, denominado Rede de Sensores Sem Fio Multimídia (RSSFM) [2, 6, 21].

Esta rede não apenas pode realizar medições de dados escalares, como também tem capacidades multimídia. Desta maneira, diversas aplicações novas que requerem informação de vídeo e de áudio são possibilitadas em várias áreas, e as aplicações existentes podem ter seu funcionamento aprimorado, como sistemas de segurança ou vigilância, de controle de tráfego, de cuidados médicos avançados, de assistência automatizada a idosos e de con-

trole de processos industriais. Nessas aplicações e em diversas outras, o dado multimídia tem o potencial de melhorar o nível de informação coletado, aumentando a faixa de cobertura e possibilitando visões multi-resolução de um mesmo evento, ao invés de dados escalares [9].

Apesar de permitirem o desenvolvimento de novos tipos de aplicações, estas redes têm problemas que limitam e dificultam o seu uso. A própria natureza dos dados multimídia impõem novas restrições, que devem ser levadas em consideração no desenvolvimento de protocolos para redes operando com estes dados. As RSSFMs herdam as características e necessidades das RSSFs. Entretanto, novas preocupações surgem ou são agravadas neste tipo de rede, como: (i) menor tolerância à latência; (ii) maior banda necessária; (iii) suporte à roteamento multi-caminhos; (iv) suporte à priorização de pacotes; (v) tratamento de buracos dinâmicos; (vi) controle rápido e eficiente de congestionamentos; (vii) recuperação de dados. Por isso, é necessário um ajuste nos protocolos para a adequação da rede ao tráfego multimídia.

## 1.2 Objetivos

A comunicação efetiva entre os nós da rede é fundamental. Abstraindo as camadas física e de enlace, que se preocupam e garantem a troca de *bits* e quadros, a comunicação entre os nós da rede como um todo ocorre nas camadas de rede e transporte, se preocupando com o estabelecimento de rotas, priorização de pacotes, controles de congestionamentos e de recuperação de erros. O objetivo desta monografia é fundamentar os conceitos necessários para o entendimento, e realizar um estudo dos trabalhos publicados com foco específico para as Redes de Sensores Sem Fio Multimídia. Dentre estes trabalhos, lidaremos com aqueles que atuam na comunicação da rede como um todo, ou seja, nas camadas de rede, transporte ou de maneira *cross-layer* entre elas. Serão apontadas as vantagens e desvantagens dos trabalhos apresentados, e indicadas direções para possíveis trabalhos futuros.

## 1.3 Estrutura da monografia

Esta monografia está estruturada em quatro capítulos. O Capítulo 2 define alguns conceitos das camadas de rede e transporte para RSSFs/RSSFMs, e os fundamentos necessários para o entendimento dos trabalhos estudados. O Capítulo 3 mostra um estudo de protocolos que atuam na comunicação nas camadas de rede e de transporte, desenvolvidos com foco explícito para as RSSFMs. Finalmente, o Capítulo 4 apresenta as considerações finais sobre o estudo realizado, indicando áreas para futuras pesquisas nas RSSFMs.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS

Este capítulo descreve os fundamentos necessários para o entendimento das RSSFs em geral. Na Seção 2.1 são apresentadas categorias de roteamento utilizadas da camada de rede, e na Seção 2.2 os conceitos e operações gerais da camada de transporte. Um detalhamento maior sobre RSSFMs é mostrado na Seção 2.3.

### 2.1 Categorias de roteamento

As RSSFs são compostas por diversos nós espalhados em uma região de interesse e, para o funcionamento correto de uma aplicação distribuída, a troca de mensagens entre os nós na rede é um requisito essencial. Para que esta comunicação ocorra, é necessário o estabelecimento de rotas de nós-origem até nós-destino em uma atividade de roteamento [5], sendo que, na maioria dos casos, os nós-destinos são **estações-base**. As categorias de roteamento plano, hierárquico, geográfico e multi-caminhos serão apresentadas a seguir.

#### 2.1.1 Roteamento plano

O roteamento plano [16] é uma categoria de roteamento multi-salto clássica. Ele é aplicado em redes que normalmente são homogêneas, e onde todos os nós colaboram para realizar uma tarefa de sensoriamento comum. Devido ao grande número de nós, a criação de um identificador global para cada nó da rede às vezes não é possível. Por isso, o roteamento plano é centrado nos dados, ao invés do endereçamento, e pouco ou nenhum esforço é realizado para organizar a rede ou o seu tráfego.

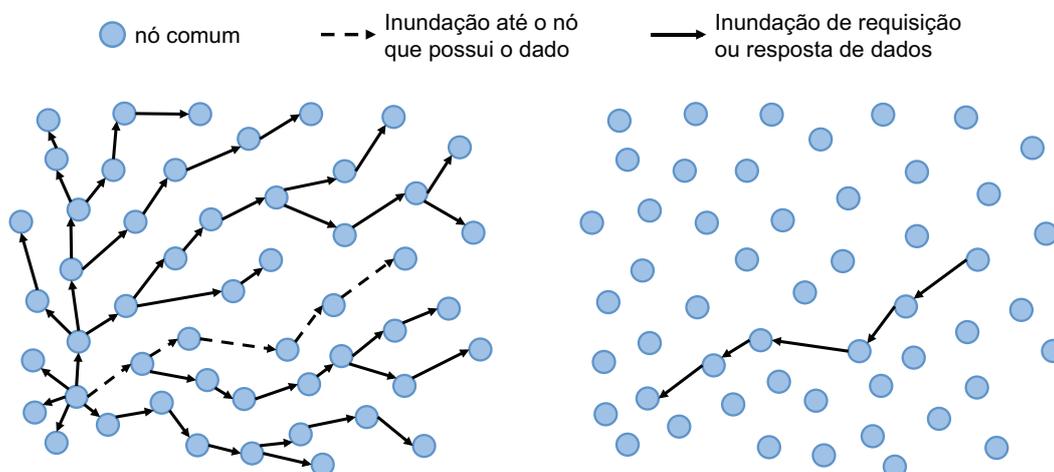


Figura 2.1: Requisição de um dado e resposta com o dado no roteamento plano

Logo, quando um nó ou estação-base precisa de um dado, ela faz uma requisição à rede e os nós que tiverem o dado solicitado o enviarão para a origem. A Figura 2.1 mostra um exemplo de requisição em inundação à esquerda e a resposta de um nó a esta requisição à direita. De maneira geral, as técnicas de roteamento plano possibilitam a agregação de dados devido às possíveis redundâncias existentes nas respostas das requisições, e elas não exigem esquemas complexos para a organização do tráfego.

### 2.1.2 Roteamento hierárquico

No roteamento hierárquico [30], os nós da rede desempenham papéis diferentes. Na abordagem mais tradicional, os nós são agrupados, tal que em cada grupo (*cluster*) haja um nó líder (ou *cluster-head*) responsável pela transmissão dos dados coletados dentro deste grupo, como mostra a Figura 2.2. A comunicação poderá ocorrer de uma maneira direta ao nó destino da rede, ou de maneira indireta, isto é, multi-salto (*multi-hop*). Na abordagem multi-salto, a maior parte do roteamento ocorre apenas entre os líderes dos grupos, deixando os nós comuns de lado nessa tarefa.

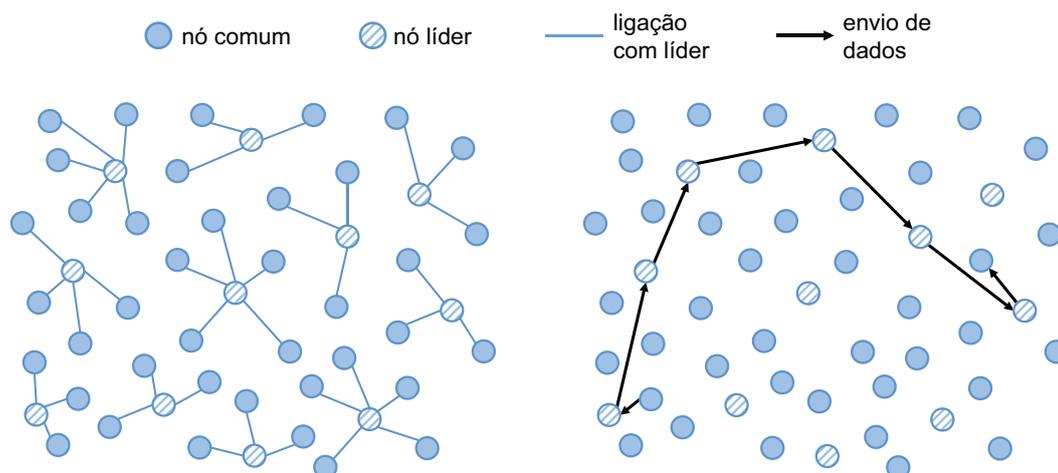


Figura 2.2: Divisão da rede em grupos e roteamento hierárquico

O agrupamento de nós pode ocorrer em mais de uma camada, criando uma hierarquia de líderes, sub-líderes, e assim em diante. O agrupamento dos nós pode levar em consideração parâmetros como: (i) proximidade espacial; (ii) quantidade de energia disponível nos nós; (iii) capacidades heterogêneas de *hardware*. Pela natureza do meio de transmissão sem fio, uma transmissão de um nó tem alcance limitado e, assim, a criação dos grupos ocorre de maneira que os nós possam se comunicar diretamente com o líder, ou utilizando um número máximo de saltos dentro do grupo. A quantidade de energia disponível dos nós muitas vezes é utilizada como parâmetro de seleção do nó líder, e os nós com menos energia são encarregados apenas da atividade de sensoriamento. As capacidades de *hardware* podem ser consideradas em uma rede heterogênea e utilizadas para

determinar diversos níveis hierárquicos.

Para realizar o balanceamento da energia interna dos grupos, uma operação comumente realizada é a rotação dos líderes. Essa alternância de líderes pode ocorrer de maneira periódica ou reativa com relação ao tempo, determinística ou aleatória com relação à seleção de novos líderes. Na abordagem periódica, é estabelecido um intervalo de tempo, após o qual é determinado um novo líder. Na abordagem reativa, o nó líder monitora sua energia e solicita uma rotação após atingir um certo patamar de energia mínima. A abordagem determinística utiliza alguma métrica para a seleção dos líderes, como a energia residual do nó ou posição dentro do grupo.

As técnicas de roteamento hierárquico normalmente permitem a agregação dos dados nos líderes, limitam o número de transmissões e facilitam o reuso espacial de canais. Elas também permitem a estruturação da rede com base nas capacidades individuais dos sensores, em se tratando de redes heterogêneas.

### 2.1.3 Roteamento geográfico

Diversos protocolos de roteamento utilizam o conhecimento de coordenadas absolutas ou relativas para operar, sendo classificados como protocolos de roteamento geográfico [22]. Essa categoria de roteamento tem como premissas que cada nó conheça a sua posição e a posição de seus vizinhos; e, que o nó origem de uma mensagem tenha conhecimento sobre a posição do nó destino. A partir destas informações, um nó pode inferir através da comparação de coordenadas qual o melhor vizinho a ser utilizado para estabelecer uma rota até o destino final, pois o conceito básico é realizar a transmissão de dados na direção do nó destino.

Normalmente, as técnicas de roteamento geográfico seguem o paradigma guloso, em que os nós, ao realizarem a transmissão de um dado, selecionam o vizinho mais próximo do nó destino. Este princípio é aplicado até que o destino seja alcançado, como mostra a Figura 2.3. Outras variações consideram fatores como o ângulo de desvio da rota entre origem e destino, ou dão preferência aos nós mais próximos do nó atual, mas ainda em direção ao nó destino. Em redes densas, os protocolos gulosos apresentam um bom desempenho, visto que é fácil achar nós na direção do destino. Já em redes mais esparsas, os nós podem não ter vizinhos na direção do destino.

O funcionamento dos protocolos de roteamento geográfico está baseado na premissa de que os nós possuem informações sobre seu posicionamento. Atualmente, com avanços tanto tecnológicos quanto algorítmicos, existem soluções de localização [7] implementadas em nível de *hardware* e em nível de *software*, cujas principais vertentes são explicadas nos tópicos abaixo.

- *Localização por GPS*: A abordagem mais tradicional e simples é o uso de dispositivos GPS (*Global Positioning System*). Ele fornece o posicionamento preciso dos nós,

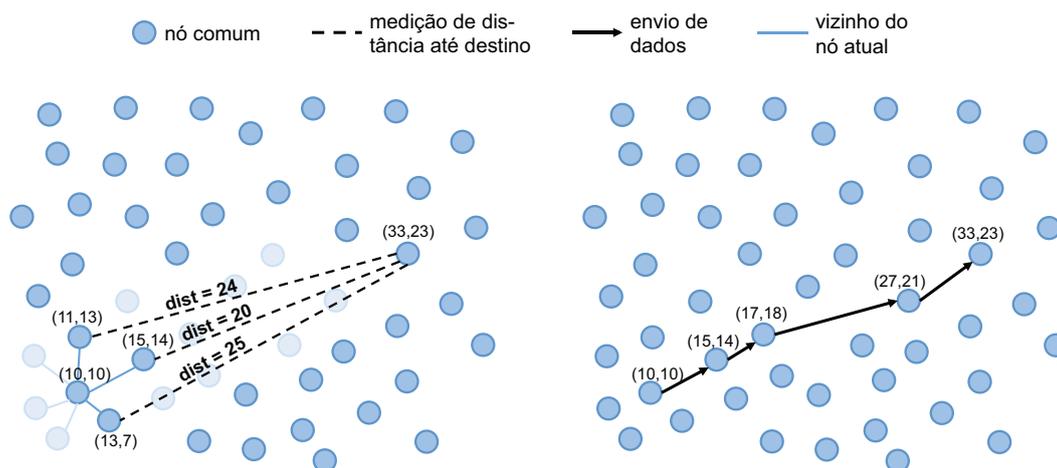


Figura 2.3: Seleção de nó para envio de dados e roteamento geográfico

porém implica no consumo grande de energia e seu uso na rede também é limitado devido ao custo necessário para se equipar todos os nós da rede com dispositivos GPS.

- *Localização por âncoras (beacons) e medição de potência:* Levando em consideração o custo para equipar uma rede inteira com dispositivos GPS, uma técnica baseada em âncoras foi desenvolvida. Ela consiste na distribuição de alguns nós diferentes na rede, capazes de saber sua posição por dispositivos GPS, ou por serem pre-programados. As âncoras transmitem as suas coordenadas geográficas em *broadcast*, e os nós que receberem três ou mais destes anúncios serão capazes de estimar suas posições. Tal cálculo envolve a potência do sinal recebido e as coordenadas da fonte da transmissão, informadas na mensagem, e consiste do cálculo da centróide entre essas coordenadas.
- *Localização relativa por medição de potência:* A rede pode ser modelada como um sistema de equações que representam restrições de proximidade entre os nós e uma região central. Tais equações levam em consideração medições de distância entre os nós, inferidas através das potências dos sinais recebidos, por exemplo.

O uso de roteamento geográfico é, de maneira geral, apropriado para aplicações em RSSF. Este tipo de protocolo é eficiente em questões de memória e de processamento. Com relação à memória, é necessário apenas o armazenamento das posições geográficas dos nós vizinhos e das estações-base e, com relação ao processamento, é um algoritmo simples e completamente distribuído.

### 2.1.4 Roteamento multi-caminhos

O uso de caminhos múltiplos e disjuntos é uma maneira de aumentar a tolerância a falhas e a performance da rede. A tolerância a falhas de um protocolo pode ser medida pela probabilidade de se encontrar uma rota alternativa para transmissão entre um nó origem e um nó destino, caso a rota principal falhe. Seguindo este princípio, protocolos de roteamento têm empregado abordagens multi-caminhos para aumentar a confiabilidade de uma transmissão. Várias vezes, protocolos mantêm rotas alternativas vivas através do envio ocasional de pacotes de controle, gerando *overhead*. Para aumentar ainda mais a confiabilidade, alguns protocolos enviam o mesmo dado por diversas rotas, utilizando da redundância dos dados para aumentar a garantia de entrega deles. Nestas abordagens é necessário balancear o *trade-off* entre confiabilidade e consumo de energia.

Em outra vertente, o uso de caminhos múltiplos e disjuntos possibilita não só maior tolerância a falhas, como também oferece maior banda para transmissão de dados, como mostra a Figura 2.4, à esquerda. Em uma rede heterogênea, em que os nós transmissores são em menor quantidade e têm melhores configurações de *hardware*, os fluxos de dados podem ter seus conteúdos propagados por vários caminhos. Tal divisão possibilita a transmissão mais rápida dos dados, mostrando-se ideal para as aplicações que necessitam de maior banda ou que têm restrições de tempo mais severas para a entrega dos dados.

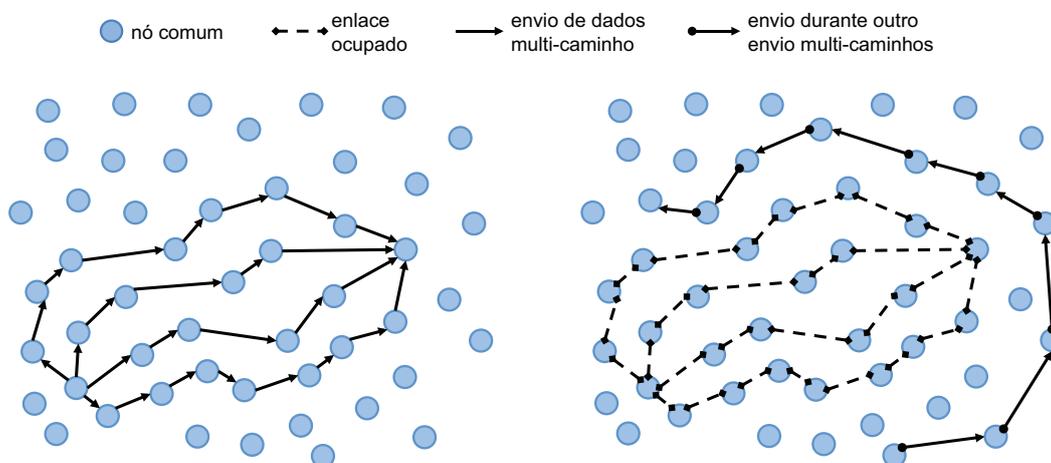


Figura 2.4: Roteamento multi-caminho e buraco dinâmico

O uso de protocolos multi-caminhos para transmissão simultânea em caminhos disjuntos acaba ocasionando o problema dos **buracos dinâmicos**, mostrado na Figura 2.4, à direita. Caminhos disjuntos normalmente são utilizados para o aumento da banda em transmissões de tráfego pesado, como fluxos de dados multimídia. Nestes casos, os diversos caminhos são reservados, e os nós que fazem parte deles não poderão ser utilizados para outras transmissões. Desta maneira, diferentes transmissões multi-caminhos ocorrendo simultaneamente podem ser prejudicadas e acabar tendo que: contornar buracos dinâmicos, realizando caminhos maiores e tendo maiores latências, como ilustrado

na figura; sendo impossibilitadas, pois não existem nós capazes de contornar os buracos dinâmicos; sendo impossibilitadas, pois um protocolo de roteamento geográfico está sendo utilizado em conjunto com o roteamento multi-caminhos, e ele não está configurado para contornar buracos dinâmicos.

## 2.2 Operações na camada de transporte

Dada a natureza da comunicação no meio aberto nas RSSF, as transmissões são muito suscetíveis a falhas, devido à possibilidade de colisões, interferências e ruídos. Assim, um dado enviado por um nó origem pode não chegar ao seu destino. Além disso, as RSSFs estão sujeitas a problemas de congestionamento, ocorrendo quando o tráfego de dados é maior do que o limite suportado pelos nós, como vistos na Figura 2.5. Ambos os problemas normalmente são tratados na camada de transporte [25, 33] através de operações de detecção e recuperação de erros e de controle de congestionamento. Além de fornecer operações que corrigem estes problemas, esta camada pode ser utilizada para otimizar parâmetros da camada de rede e influenciar nas rotas utilizadas.

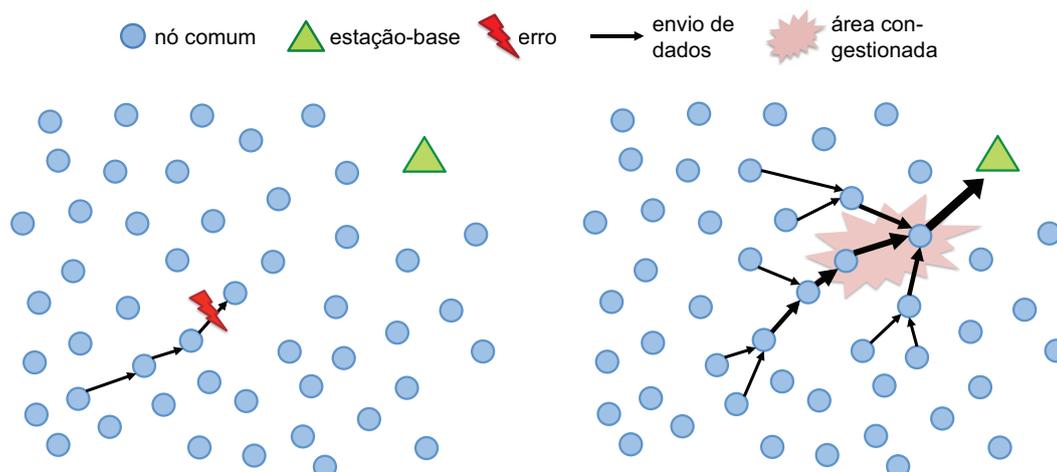


Figura 2.5: Erro no envio de dados e congestionamento na rede

### 2.2.1 Detecção e recuperação de erros

As RSSFs estão sujeitas a falhas nas transmissões de dados devido às características do meio sem fio, sujeito à colisões, interferências e ruído. Assim, a confiabilidade na transmissão de um dado pode também ser tratada na camada de transporte. Os seguintes tipos de confiabilidade são possíveis:

- *confiabilidade de pacotes*: Este tipo é o mais tradicional e bem explorado. Ele visa garantir que todos os pacotes sejam enviados com sucesso ou com pelo menos uma certa taxa de entrega.

- *confiabilidade de eventos* [1]: Existem aplicações que necessitam apenas da detecção precisa de um evento. Como as RSSFs podem apresentar altas taxas de redundância, diversos nós podem reportar um mesmo evento, e não é necessário que todos os pacotes enviados sejam entregues, mas sim, que o evento seja reportado pelo menos uma vez.
- *confiabilidade de destino* [23]: Em algumas situações, é desejável que um conjunto de pacotes enviados consiga atingir uma determinada região da RSSF ou nós equipados com um tipo específico de sensor.

A detecção da perda de um dado pode ocorrer de maneira explícita ou implícita [6]. A abordagem **explícita** pode ser utilizada para detecções de falha tanto salto-a-salto, como fim-a-fim, e utiliza mensagens de confirmação e negação de recebimento (ACKs e NACKs) dos dados enviados. A abordagem **implícita** só pode ser empregada para a detecção de falhas salto-a-salto, e utiliza a captura de dados para verificar se o nó para o qual um dado é enviado está encaminhando este dado da maneira adequada. Esta última abordagem não necessita de pacotes de controle, e com isso pode consumir menos energia. Porém, é possível que a captura de dados não seja realizada com sucesso, ou mesmo seja inviável em determinados tipos de RSSFs, enquanto o uso de mensagens de confirmação de recebimento são uma abordagem mais direta.

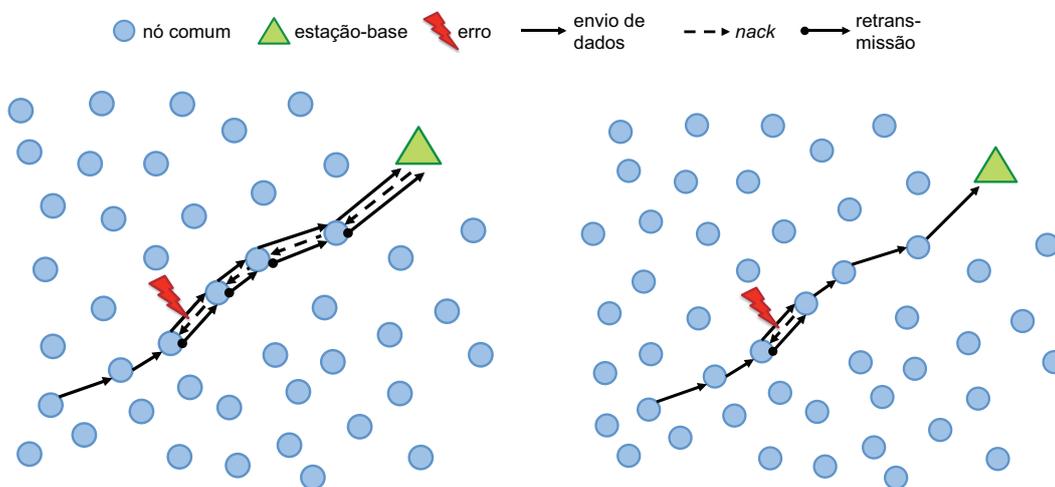


Figura 2.6: Recuperação de dados fim-a-fim e salto-a-salto

A recuperação de dados **fim-a-fim** é a mais tradicionalmente utilizada e se preocupa com a detecção das falhas apenas no destino final. Caso o destino final de uma mensagem detecte um erro ou a ausência de alguma mensagem, ela solicitará o trecho dos dados que faltam através de uma mensagem NACK e então, os nós que possuem os trechos encaminharão eles novamente até o destino final. Já na abordagem **salto-a-salto** [6, 32], a recuperação de dados é similar à realizada na camada de enlace. Isto é, a cada salto que uma mensagem passa, ela é verificada de acordo com a estratégia, e caso a mensagem

apresente erro, será reenviada pelo nó anterior. Esta abordagem tem como vantagens menor tempo de resposta e menor consumo de energia, porém necessita que os nós intermediários entre o nó origem e o destino de uma mensagem mantenham temporariamente uma *cache* dos dados enviados, para realizar a recuperação. Ambas as abordagens são ilustradas na Figura 2.6.

### 2.2.2 Controle de congestionamento

O congestionamento no tráfego de dados ocorre quando a taxa de recebimento de mensagens for superior à taxa de encaminhamento delas ou quando há um desempenho ruim em nível de enlace, apresentando contenção ou interferência. Em RSSFs reativas a eventos, existe uma alta probabilidade de que um mesmo evento seja detectado por diversos nós e, desta maneira, o tráfego ocasionado seja intenso ao reportar simultaneamente o evento para uma estação-base. As áreas próximas das estações-bases são as mais afetadas pelo congestionamento, visto que a rede sofre uma espécie de efeito de afunilamento das rotas e o tráfego gerado converge para pontos específicos da rede. Tais áreas sobrecarregadas são chamadas de *hot spots* [31].

O problema do congestionamento pode afetar severamente as RSSFs, pois além de denegrir a taxa e o tempo de entrega das mensagens, ele também aumenta o consumo de energia dos nós, devido ao número alto de reenvios das mensagens. Se nenhum tipo de técnica de detecção e controle for utilizada para remediar situações de congestionamento, os pacotes em excesso serão descartados. Com isso, os reenvios de mensagens serão cada vez mais constantes e consumirão cada vez mais energia, apresentando uma taxa minguante de sucessos nos reenvios.

O congestionamento pode ser detectado através do monitoramento [25, 26] de filas de envios dos nós, taxas de ocupância de seus canais, contenção na camada de enlace e taxa de perda de mensagens. Após detectado um congestionamento, técnicas de controle de congestionamento devem ser aplicadas, iniciando pela notificação das origens dos tráfegos. Tal notificação pode ocorrer de maneira **implícita**, através de uma *flag* de controle na mensagem de resposta, ou **explícita**, através de uma mensagem encaminhada diretamente para as origens. Existem também abordagens que não dependem de notificação ou que a utilizam em conjunto com o monitoramento do tráfego do nó vizinho, para descobrir quando este nó está em uma situação de congestionamento.

Após as origens de tráfegos serem notificadas, elas podem limitar as suas taxas de transmissão de dados para os seus nós vizinhos. Esta limitação pode ser realizada diminuindo a qualidade do dado enviado, se isso for possível, intencionalmente inserindo latência entre as mensagens, ou até mesmo descartando as mensagens de baixa prioridade. Outra possibilidade é o uso de um caminho disjunto ou de uma rede separada para o encaminhamento dos dados até a estação-base. Desta forma, a rota atualmente congestionada

terá seu tráfego diminuído. Ambas as técnicas mencionadas podem ser observadas na Figura 2.7.

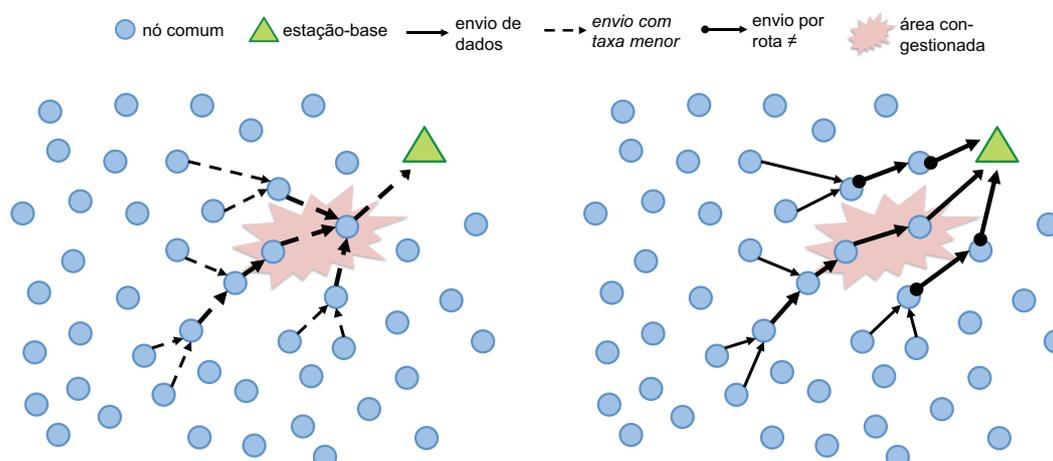


Figura 2.7: Controle de congestionamento por ajuste de taxa e caminhos disjuntos

### 2.2.3 Seleção de rotas

A camada de rede depende de diversos parâmetros para o seu funcionamento, e a camada de transporte pode aproveitar a proximidade e a interação existente entre elas para ajustar estes parâmetros de acordo com as necessidades da RSSF em abordagens *cross-layer*. Em protocolos de roteamento baseados em múltiplos caminhos, é comum descobrir diversas rotas de um nó origem até um nó destino, e a seleção das rotas a serem utilizadas pode ser passada da camada de rede para a camada de transporte. Desta maneira, o problema do congestionamento e as necessidades da aplicação podem ser considerados na seleção das rotas.

Por exemplo, aplicações de monitoramento em tempo real reativas a eventos podem apresentar tráfegos pouco constantes, porém estes dados devem ser transmitidos com baixa latência. Neste caso, é importante que o caminho mais rápido até a estação-base seja utilizado, como visto na Figura 2.8, à esquerda. Já aplicações de coleta contínua de dados escalares, como o monitoramento de temperatura, luminosidade e umidade em uma floresta, têm tolerância à latência, mas precisam de rotas que balanceiam a energia da rede e aumentam o seu tempo de vida. Nessas aplicações, a seleção deveria ser por uma rota que balanceie a energia entre os nós, mesmo que apresente maior latência, como na Figura 2.8, à direita.

Existem aplicações nas quais outros critérios de seleção podem ser utilizados. Por exemplo, aplicações nas quais alguns dados têm maior prioridade e devem ser transmitidos ou por um caminho mais confiável, ou por um caminho de menor latência. Ou mesmo aplicações nas quais a transmissão simultânea por mais de um caminho é desejável, e a

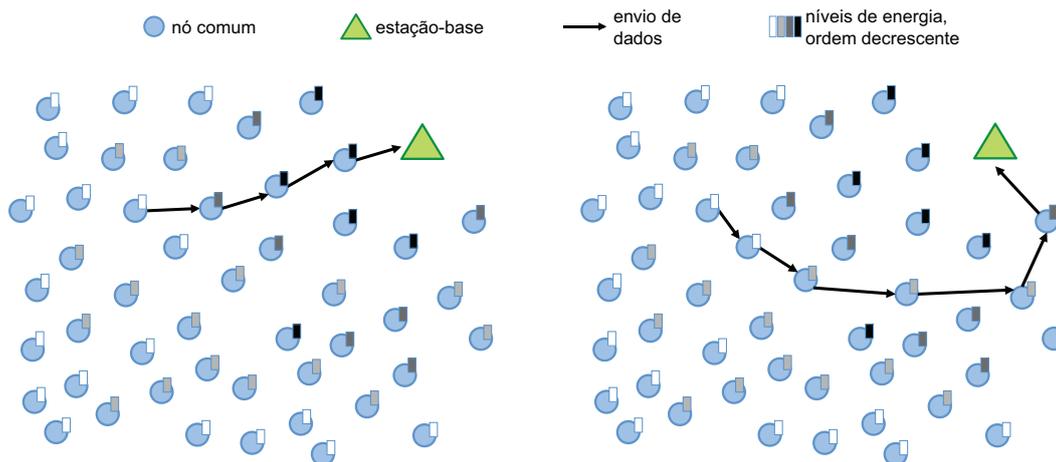


Figura 2.8: Seleção de rota: prioridade em baixa latência x equilíbrio de energia

camada de transporte pode auxiliar na escolha da quantidade de caminhos ideais e na seleção destes caminhos em si, como será visto adiante.

### 2.3 Redes de sensores sem fio multimídia

A integração recente de tecnologias de comunicação sem fio com componentes de *hardware* barato, como microfones e câmeras baseadas em semicondutores complementares de metal-óxido, possibilitou o desenvolvimento de nós capazes de realizar transmissões de fluxos de vídeo e áudio. A combinação disso com a evolução natural das capacidades de processamento e armazenamento dos nós e das técnicas de processamento de sinais permitiu o surgimento de um novo tipo de rede, denominado Rede de Sensores Sem Fio Multimídia (RSSFM) [2].

Este tipo de rede pode não só realizar a coleta de dados escalares, como também capturar dados multimídia. As RSSFM possibilitam um vasto escopo para aplicações [6] que requerem informações de áudio e vídeo, como sistemas de segurança ou vigilância, controle de tráfego, cuidados médicos avançados, assistência automatizada aos idosos e controle de processos industriais. Nessas aplicações e em diversas outras, o dado multimídia tem o potencial de melhorar o nível de informação coletada, aumentando a faixa de cobertura e possibilitando visões multi-resolução de um mesmo evento, ao invés de dados escalares [9].

Contudo, uma RSSFM dificilmente será composta apenas por nós que têm capacidades multimídia e, desta forma, a heterogeneidade dos nós será mais comum na rede. Por isso, há a necessidade de configurar a rede em arquiteturas que a tornem mais escalável e eficiente, levando em consideração as capacidades dos diferentes tipos de nós. Normalmente, as arquiteturas das RSSFM podem ser divididas em três categorias gerais [3]: (i) rede de camada única; (ii) rede de camada única baseada em grupos; (iii) rede de múltiplas camadas. Essas categorias são ilustradas na Figura 2.9, e todas elas têm como

destino final uma estação-base, conectada na Internet através de um *gateway*. A partir da Internet, os dados coletados se tornam disponíveis de acordo com as necessidades da aplicação.

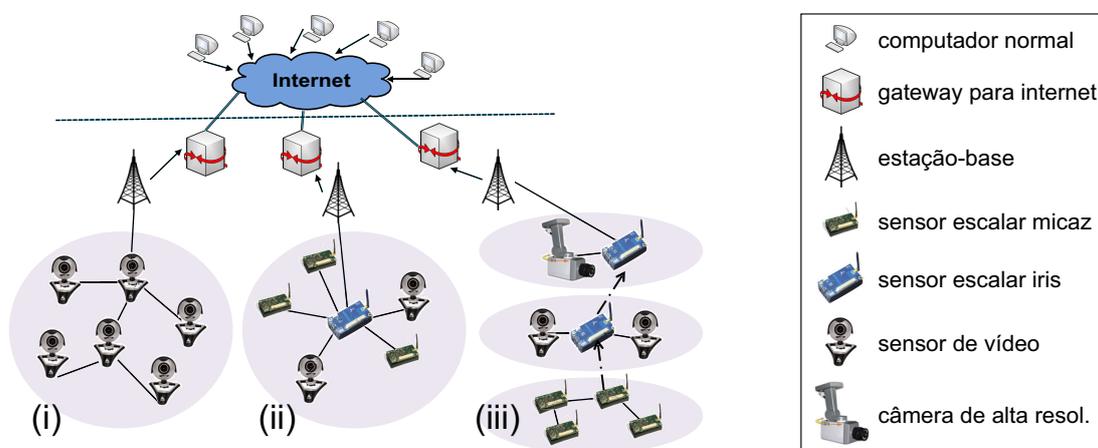


Figura 2.9: Arquiteturas possíveis para uma RSSFM

Na categoria **rede de camada única**, não existe nenhuma divisão hierárquica. Os nós são geralmente homogêneos e devem cumprir a tarefa de monitoramento de vídeo comum a todos, tal que o processamento é distribuído entre estes nós. A categoria de **camada única baseada em grupos** utiliza o conceito de hierarquia fundamentado na existência de grupos representados por líderes. Esses grupos são heterogêneos e o processamento normalmente é centralizado no líder, possibilitando o uso de técnicas que eliminem ou diminuam a redundância dos dados. Caso a heterogeneidade da rede seja ainda maior, é comum o uso de **múltiplas camadas**. Na ilustração apresentada, pode-se imaginar uma aplicação que tenha na camada mais baixa apenas nós com sensores escalares, monitorando variações simples no ambiente. Caso um evento seja notado, a camada superior é acordada, composta de nós com capacidades básicas de vídeo. Na detecção de um evento relevante, uma câmera de alta resolução no nível superior realiza a captura precisa do evento. Essa abordagem distribui processamento entre as diversas camadas hierárquicas e diminui o consumo de energia da rede, utilizando apenas as camadas necessárias.

### 2.3.1 Requisitos

As RSSFMs têm algumas necessidades adicionais em relação às RSSFs tradicionais [2, 6, 21]. Devido à própria natureza do tráfego multimídia, ele comumente necessita de entrega de dados em tempo real, isto é, tem **menor tolerância à latência**. Além disso, a **banda necessária para a transmissão é maior**, visto que um fluxo multimídia contém muito mais dados do que uma transmissão de dados escalares. Esse fator pode ser ainda mais agravado em redes cujo tráfego é reativo a eventos. Nessas redes, normalmente existirão mais de uma câmera ou microfone capazes de cobrir o evento de interesse, e os fluxos

gerados serão disparados repentina e simultaneamente. Protocolos das camadas de rede e transporte devem se preocupar em otimizar o uso da banda disponível para transmissões. Assim, em caso de redes com alta densidade de nós com capacidade de captura de vídeo, as imagens capturadas terão áreas em comum, como observado na Figura 2.10, e devem ser tratadas.

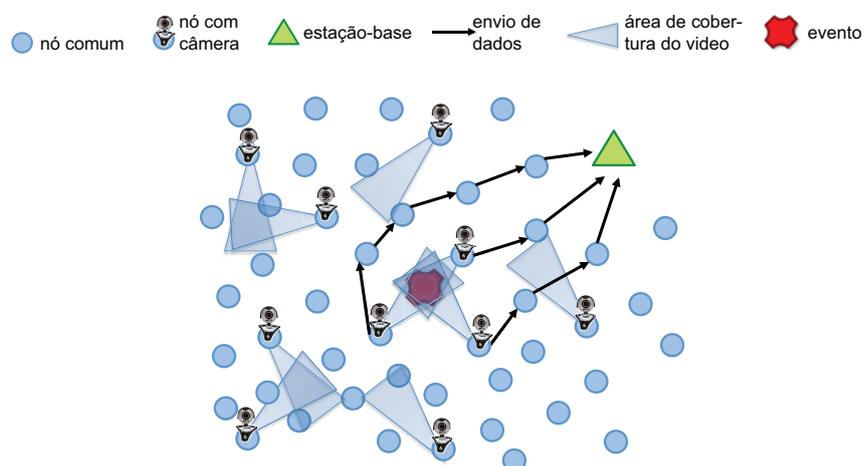


Figura 2.10: Redundâncias na captura de um evento

O fluxo de dados multimídia demanda muitos recursos para a sua transmissão, mesmo que as redundâncias sejam devidamente tratadas. Desta maneira, técnicas devem ser empregadas para otimizar ainda mais o uso da banda disponível. Normalmente, os nós geradores de dados multimídia têm melhores configurações do que a maior parte dos nós compondo a rede, podendo realizar transmissões a uma velocidade maior. Entretanto, a velocidade de transmissão em uma rota é limitada pelo nó de menor capacidade de transmissão, limitando o uso da capacidade disponível no nó origem. O **suporte ao roteamento por múltiplos caminhos** é uma abordagem que otimiza o uso da banda disponível para a transmissão de dados. Caso o roteamento ofereça diversas rotas para uma dessas origens de tráfego, ela pode realizar a transmissão de dados simultaneamente por rotas diferentes, otimizando o uso da banda disponível.

Além disso, o suporte ao **envio de dados com prioridades diferentes** precisa ser mais robusto. Várias técnicas de processamento de dados multimídia consistem em quebrar o fluxo multimídia em subfluxos de diferentes importâncias, como a separação em uma camada principal e diversas camadas de melhoramento. Com isso, diminui-se o uso da banda com o envio de menos camadas de melhoramento. Entretanto, caso a camada principal seja perdida, as camadas de melhoramento se tornam inúteis. O uso de prioridades diferentes também é útil em aplicações nas quais o áudio tem maior importância do que o vídeo, ou o contrário. Além disso, a priorização entre fluxos de mesma natureza pode ser necessária para certas aplicações.

O **tratamento de buracos na topologia** também deve ser realizado de maneira mais

rigorosa. Um buraco na topologia é uma região na qual não existem nós para realizar o roteamento. Estes buracos podem simplesmente estar presentes na topologia desde o início do tempo de vida da rede, podem ser criados permanentemente devido à muitas mortes de nós em uma região, ou surgirem temporariamente, devido à transmissão de dados - é o caso dos buracos dinâmicos, como visto na Figura 2.4. No caso do fluxo de dados multimídia, os nós integrantes de rotas são de uso exclusivo de apenas uma origem, devido à intensidade do tráfego. Assim, diversos nós ficam bloqueados temporariamente, e outras transmissões de dados simultâneas terão que lidar com os buracos.

O tráfego mais intenso nas RSSFMs agrava o problema do congestionamento. Assim, a rede sofrerá severamente de perdas de pacotes e reenvios de dados, criando um efeito bola-de-neve, que agrava cada vez mais o congestionamento. Um requisito essencial nas RSSFMs é o **controle rápido e eficiente de congestionamentos**, para evitar que eles levem a mortes de nós ou saturação da banda da rede, podendo até mesmo impedir o controle do congestionamento. Além disso, mecanismos de **recuperação de dados** devem ser utilizados para garantir um patamar tolerável de qualidade no vídeo recebido no destino final, mesmo que a recuperação seja apenas parcial.

## CAPÍTULO 3

### ESTUDO DE TRABALHOS

Este capítulo detalha um estudo de protocolos desenvolvidos com foco explícito para as RSSFMs, que atuam na comunicação. Tais protocolos operam nas camadas de rede e de transporte, ou de maneira *cross-layer* entre elas. A Seção 3.1 apresenta os protocolos da camada de rede. Os protocolos de transporte são apresentados na Seção 3.2. Finalmente, as abordagens *cross-layer* entre essas camadas são descritas na Seção 3.3.

#### 3.1 Técnicas multimídia na camada de rede

Diversas técnicas têm sido empregadas em nível de rede para otimizar as transmissões multimídia. As necessidades tratadas consistem no melhor proveito da banda disponível, na eficiência em energia, e no estabelecimento de rotas com níveis aceitáveis de QoS. Dessa forma, protocolos nessa camada normalmente se apoiam no conhecimento geográfico e no uso de múltiplos caminhos para executar a transmissão. A seguir, são descritos alguns destes protocolos.

##### 3.1.1 TGPF

O TGPF [28] é um protocolo de roteamento geográfico proposto por Shu et al. Ele se baseia no uso de múltiplos caminhos, visando utilizar simultaneamente as rotas de menor latência e, desta forma, otimizar o uso da banda disponível na RSSFM. O procedimento de descoberta de rotas usa uma política de duas fases, que consistem no descobrimento da rota inicial, e na otimização da mesma. Tal procedimento pode ser repetido diversas vezes para obter várias rotas disjuntas. O TGPF realiza a transmissão dos dados pelos múltiplos caminhos descobertos em uma abordagem puramente gulosa e geográfica. A relevância do TGPF consiste em ser um dos primeiros a se preocupar em contornar os buracos dinâmicos.

A operação de **estabelecimento inicial da rota** é baseada nas coordenadas geográficas dos nós. A fase inicial da operação seleciona como próximo salto sempre o nó vizinho mais próximo da estação-base, podendo ele estar mais distante do que o nó atual. Essa abordagem, embora ocasionalmente construa rotas mais longas do que o necessário, garante que o algoritmo de encaminhamento guloso não caia em ótimos locais e consiga atingir o nó destino. Quando um nó não tiver nenhum outro vizinho além do nó anterior, ele será marcado como um nó de bloqueio. A rota então voltará a ser construída a partir do nó anterior, dado que um nó de bloqueio não pode ser utilizado como próximo salto.

Essa operação pode ser repetida recursivamente, até que a rota seja estabelecida com sucesso. Embora o desempenho desse algoritmo em uma rede ideal não seja ótimo perto de outras técnicas existentes, seu desempenho é melhor sob condições realísticas.

A rota criada por esse processo pode conter nós desnecessários e assim, após seu estabelecimento inicial, ela é otimizada. A operação de **otimização da rota** visa diminuir a quantidade de nós utilizados. Se um nó possuir dois ou mais vizinhos que façam parte da rota, sem contar o nó anterior, é possível realizar uma redução no número de saltos dela. O funcionamento depende de uma mensagem de confirmação enviada pela estação-base, que passa pelos nós da rota estabelecida inicialmente e sempre seleciona o nó mais distante no sentido oposto à estação-base, descartando os desnecessários.

O TGPF estabelece uma quantidade muito maior de caminhos descobertos em comparação com outros protocolos, com uma distância em saltos inferior até a estação-base. A necessidade de utilizar vários caminhos disjuntos simultaneamente se dá pela saturação da banda disponível nos caminhos individuais. Visto que o TPGF emprega uma abordagem que explora sempre o caminho mais curto disponível, a distância entre os nós que fazem parte dos diferentes caminhos pertencentes a um mesmo fluxo é pequena, como visto na Figura 3.1. Entretanto, ao utilizar um número grande de caminhos muito próximos sem qualquer controle de canais ou preocupação com a política de acesso ao meio, aumenta-se o número de colisões de dados e o desempenho da rede é deteriorado em questão de taxa de entrega e reenvio de dados. Além disso, o TPGF considera apenas a distância em saltos como métrica para criação das rotas, deixando de lado fatores como banda ou qualidade do canal entre dois nós.

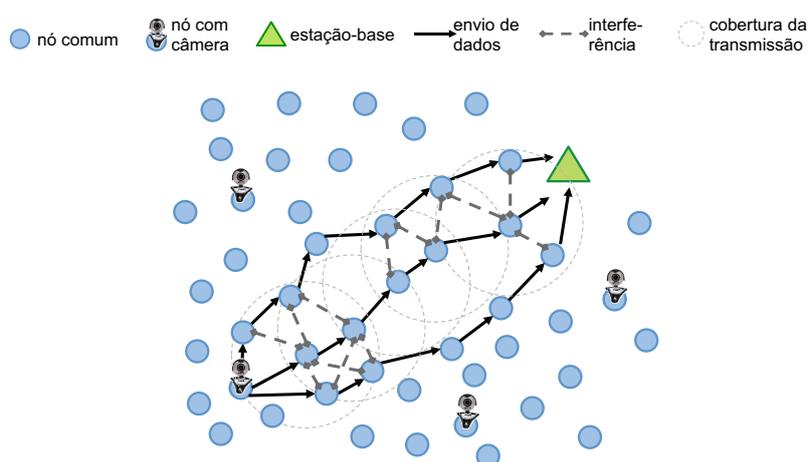


Figura 3.1: Exemplos de interferências/colisões causadas pelos caminhos próximos

### 3.1.2 AGEM

Medjiah et al. propuseram o protocolo de roteamento geográfico AGEM [19]. Ele considera as restrições de latência e a necessidade de balancear o consumo de energia entre os

nós. O protocolo balanceia o tráfego de dados e consumo de energia na rede utilizando uma política de duas fases. A fase de encaminhamento de dados é um procedimento guloso que utiliza fatores do histórico de encaminhamentos, como o número médio de saltos percorridos, a fim de otimizar o balanceamento da energia. Com objetivo de contornar buracos que podem surgir decorrentes de mortes de nós, existe a fase de encaminhamento reverso de dados.

O protocolo AGEM estende o trabalho realizado por Karp e Kung [14] ao incorporar mecanismos que aumentam o tempo de vida da rede e reduzem a ocupância da fila dos nós mais utilizados na rede. Esses mecanismos são necessários, pois o protocolo original utilizava sempre a mesma rota, causando a morte prematura dos nós. No AGEM, a rota de encaminhamento dos dados depende dos seguintes fatores: energia dos nós vizinhos; número de saltos já realizado pelo dado até o nó atual; distância entre o nó atual e seus vizinhos; histórico de dados pertencentes ao mesmo fluxo já encaminhados; distância dos nós vizinhos até a estação-base.

A fase de encaminhamento de dados utiliza um algoritmo de seleção de nós baseado em um desvio angular na rota entre nó origem e estação-base, ilustrado na Figura 3.2<sup>1</sup>. Inicialmente, o desvio angular deve ser o menor possível, tal que um número mínimo de nós predefinido seja encontrado dentro do escopo do ângulo. Este ângulo é então incrementado até que o número mínimo de nós estabelecido seja encontrado. Suponha que na figura o número mínimo de nós a serem achados seja quatro. Como com  $30^\circ$  eles não são encontrados, o ângulo é incrementado até  $60^\circ$ . Se tal ângulo chegar ao limite de  $180^\circ$  e não existir nenhum nó apto a continuar o encaminhamento guloso, o encaminhamento reverso deverá ocorrer.

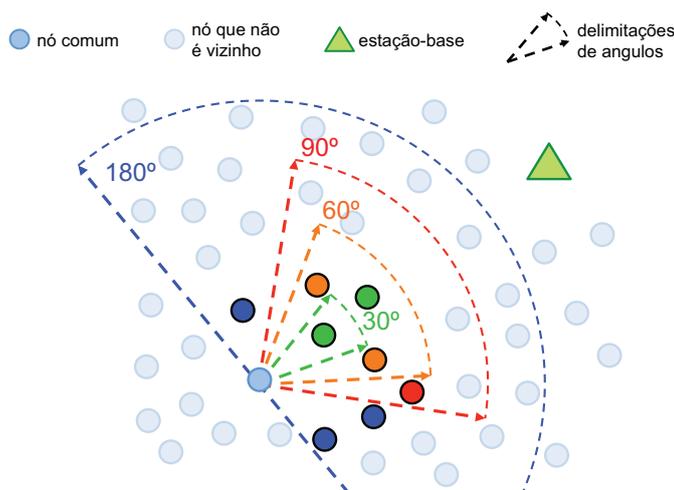


Figura 3.2: Desvio angular utilizado pelo protocolo AGEM

O nó que realiza o **encaminhamento direto** de uma mensagem seleciona como

<sup>1</sup>Os ângulos são apresentados com um raio maior que o necessário apenas para facilitar o entendimento

próximo salto um dos nós vizinhos de dentro do ângulo em questão. Cada um destes vizinhos será inicialmente pontuado através de uma função  $f(x)$ , que considera a sua energia e o custo da comunicação, e indexado em ordem de pontuação. O encaminhamento de um dado será realizado para o vizinho de maior  $f(x)$ , caso o dado seja o primeiro recebido do fluxo como um todo. Do contrário, será enviado para um nó de pontuação proporcional à variação do número médio de saltos que os dados do fluxo em questão sofrem até chegar ao nó atual<sup>2</sup>. A idéia é encaminhar o dado de um fluxo cuja média de saltos tenha aumentado para vizinhos de maior energia, e encaminhar o dado de um fluxo cuja média tenha diminuído para vizinhos de menor energia. Caso um nó responsável pelo encaminhamento dos dados não tenha algum vizinho na direção da estação-base dentro do ângulo limite de 180°, ele realizará o **encaminhamento reverso** para o nó menos distante da estação-base. Este processo é repetido recursivamente até que um conjunto de nós aptos a encaminhar os dados seja encontrado, retomando o processo de encaminhamento direto.

O protocolo AGEM é importante por utilizar uma abordagem inovadora de vizinhança baseada no desvio angular entre o nó origem e a estação-base, e apresentou uma queda grande na latência e no número de pacotes perdidos nas transmissões. Entretanto, ele foi avaliado apenas em cenários estáticos, onde a sua utilidade acaba sendo limitada. Nestas redes, a política de encaminhamento do protocolo não balanceia a energia da maneira mais eficaz. A mudança em uma rota ocorre principalmente pela variação do número médio de saltos dos dados de um fluxo. Em redes estáticas, existirão vários casos em que um nó será exaustivamente utilizado como parte da rota, sem que o número de saltos varie, para só então o nó encaminhador perder pontuação na função  $f(x)$  e outro nó ser adotado como novo nó encaminhador. Somente esta mudança inicial na rota, ocasionada pelo uso exaustivo de um mesmo nó, fará com que o número de saltos varie e crie as condições adequadas para a adoção de outra rota. Além disso, os múltiplos caminhos jamais são utilizados simultaneamente para melhor proveito da banda disponível.

### 3.1.3 NAMVD

O protocolo NAMVD<sup>3</sup> [15] criou um mecanismo de transmissão que melhora a qualidade do vídeo recebido no destino. Ele faz o escalonamento de pacotes e de caminhos, levando em consideração qual a importância que o pacote de dados reflete na qualidade do vídeo no destino final, e qual a rota que oferece a qualidade de transmissão mais adequada à importância do pacote. Tal conceito pode ser diretamente aplicado em técnicas de codificação de vídeo que utilizam quadros de referência e quadros de atualização de imagem,

---

<sup>2</sup>Em redes com mobilidade um nó A que está perto de um nó B pode acabar se distanciando dele, e receber outro dado do mesmo fluxo que tenha percorrido uma rota diferente

<sup>3</sup>O protocolo não possui um nome dado pelos autores. O nome utilizado, NAMVD, vem do título “Network-Adaptive Multipath Video Delivery”

que dependem destas referências.

Normalmente, um fluxo comprimido de vídeo é composto por blocos de dados, chamados de Grupos de Imagens (GdI). Um GdI é composto de quadros que representam uma seqüência de imagens consecutivas, e o vídeo em si é composto de GdIs consecutivos. Um GdI pode conter os tipos de quadros de imagens vistos na Figura 3.3. O **I-quadro** é uma imagem de referência fixa que não depende de outros quadros. O **P-quadro** é um quadro que contém informações relativas à diferença entre a imagem criada pelo quadro anterior e a imagem atual no vídeo. Finalmente, o **B-quadro** é um quadro que contém informações bidirecionais sobre a diferença entre o B-quadro em questão e os quadros anterior e o seguinte.

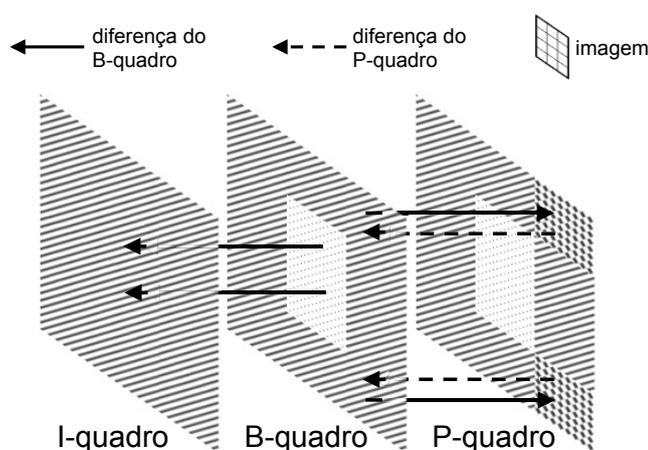


Figura 3.3: Informações sobre as diferenças de imagens salvas nos quadros de vídeo

O I-quadro contém informações absolutas, enquanto os P- e B- quadros possuem informações relativas que devem ser combinadas. A perda de quadros mais importantes causa uma distorção maior no vídeo formado pela combinação dos quadros recebidos no destino. Desta maneira, deve-se assegurar que os quadros mais importantes, os I-quadros, tenham maior probabilidade de atingir o destino. Para isso, uma política de **escalonamento de pacotes** atribui maior prioridade aos I-quadros, seguido dos B-quadros, que possuem mais informações relativas do que os P-quadros.

O NAMVD possui também uma política de **escalonamento de caminhos**. Esta política distribui os pacotes eficientemente entre diversas rotas através de uma extensão do trabalho proposto por Hurni e Braun [13]. Os caminhos são pontuados através de uma função que leva em consideração fatores como tamanho de fila nos nós, energia, distância em saltos, taxa de perda de pacotes, latência e banda disponível. Como as condições da rede são dinâmicas, a pontuação de cada caminho é atualizada periodicamente através de mensagens de controle.

Para a transmissão de um fluxo de dados no NAMVD, caminhos disjuntos até a estação-base são inicialmente explorados. Então, são coletadas mais informações sobre os caminhos que satisfazem as restrições de latência impostas, a fim de pontuá-los. Final-

mente, um escalonamento ponderado do tipo *round robin* é executado para distribuir os pacotes entre os caminhos de diferentes pontuações. Assim, os pacotes de maior prioridade utilizarão os caminhos de maior pontuação. Se a banda disponível em um caminho não satisfizer o necessário para a transmissão, os pacotes de menor prioridade serão descartados.

O protocolo NAMVD não considera fluxos de áudio e depende de algum outro protocolo de roteamento que atue abaixo dele para realizar a exploração das rotas. Desta maneira, ele não pode atuar de maneira independente. Ao ser utilizado em conjunto com o AOMDV [37], o NAMVD apresentou uma menor perda de quadros devido ao uso de caminhos melhor pontuados e, com isso, a qualidade do vídeo recebido teve uma melhoria considerável em termos de PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*). Embora a priorização das rotas seja o bastante para um desempenho melhor, o protocolo apresentou uma taxa nula de perda de P- e B- quadros, enquanto foram perdidos alguns I-quadros, sugerindo algum erro na política de priorização de pacotes ou em sua implementação.

### 3.1.4 Multimedia Aware MMSPEED

Darabi et al. propuseram uma extensão do protocolo geográfico MMSPEED, chamada MA-MMSPEED [10]. Esta extensão aproveita as informações específicas dos fluxos de vídeo durante a fase de roteamento. Assim como no protocolo NAMVD, o MA-MMSPEED considera que o vídeo é quebrado em diversos I-quadros (quadros absolutos), P- e B- quadros (quadros de referência), e que os I-quadros apresentam uma importância maior. A extensão foi motivada pelo suporte do protocolo MMSPEED a múltiplos caminhos, respeitando as restrições de latência e oferecendo garantias de confiabilidade. Entretanto, ele apresenta uma queda significativa no QoS (*Quality of Service*) mesmo com poucas fontes de tráfego multimídia.

O MMSPEED [11] provém diferenciação de QoS com relação à latência e à confiabilidade, de maneira que os pacotes podem utilizar a combinação certa de prioridades. Para isso, foi criado um mecanismo que oferece **múltiplas opções de velocidade na rede**, se aproveitando da redundância ao realizar um **encaminhamento probabilístico e multi-caminhos dos dados**. Outro aspecto importante é o tratamento do QoS fim-a-fim, provido com base em decisões locais nos nós. A operação de **compensação dinâmica** corrige a imprecisão de decisões locais, à medida que um pacote viaja em direção ao seu destino. O protocolo se preocupa em prover as condições necessárias para aplicações críticas que executam por períodos limitados de tempo, de horas ou no máximo de dias.

Para satisfazer os envios de dados com prioridades diferentes na rede, uma arquitetura que permite múltiplas opções de velocidade de transmissão é estabelecida. Sendo um protocolo geográfico, cada nó sabe as coordenadas de seus vizinhos e da estação-base. Dessa maneira, pode-se inferir qual a distância percorrida em direção à estação-base

quando um dado é enviado para um vizinho. Essa informação, combinada com a latência medida entre dois vizinhos, mede a velocidade da transmissão em metros por segundo (m/s) em direção à estação-base. Assim, são criadas diversas camadas de diferentes prioridades na rede com base na velocidade, como ilustrado à esquerda na Figura 3.4.

A transmissão de um dado por essas camadas ocorre com base no *deadline* do pacote. Se uma camada de baixa velocidade puder satisfazer o *deadline* do pacote, ela será utilizada. Então, a cada salto, verifica-se se o pacote ainda será entregue dentro do tempo estipulado através da atual rota. Em caso de latências maiores do que o previsto, impossibilitando a entrega no tempo correto, camadas de maior velocidades poderão ser utilizadas, através do esquema de compensação dinâmica. Deve-se notar que, embora essas camadas já estejam priorizadas em nível de rede, o protocolo MMSPEED também realiza modificações na camada de enlace para priorizar os pacotes de alta velocidade.

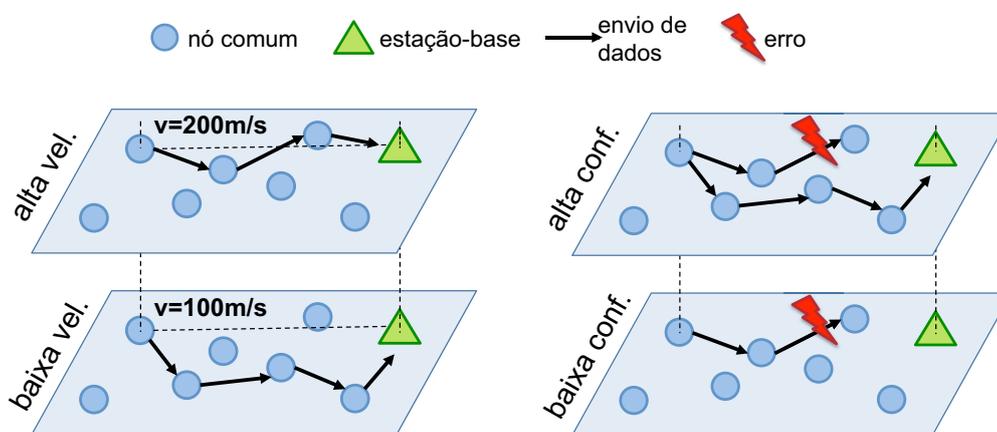


Figura 3.4: Roteamento com diferentes velocidades e confiabilidades no MMSPEED

A questão da confiabilidade é tratada com o uso de múltiplos caminhos. Os dados de maior importância podem utilizar mais caminhos para que, através da redundância, exista uma maior probabilidade de entrega, como visto na Figura 3.4, à direita. Uma política de exploração de caminhos adicionais considera fatores como estimativa local de erro, distância entre vizinhos, taxa de perdas de pacotes, taxa de descartes intencionais e taxa de erros na camada MAC. Através dessa política, o número de caminhos explorados é determinado de maneira que a probabilidade requerida pelo pacote seja satisfeita. Essa operação também usa a compensação dinâmica para garantir que a probabilidade de entrega de um pacote sempre seja superior ao desejável.

A extensão MA-MMSPEED utiliza os caminhos de diferentes velocidades para priorizar os diferentes quadros existentes no fluxo multimídia. Os I-quadros são enviados por rotas de maior velocidade, enquanto os P- e B- quadros são enviados por rotas de velocidade inferior. Esta aumenta a qualidade do vídeo recebido em termos de PSNR, e equilibra melhor o consumo de energia por causa do uso constante de rotas de diferentes prioridades para os diferentes quadros. Entretanto, a eficiência em termos de energia é

deixada de lado. Além disso, a noção de multi-caminhos para o escopo de RSSFM não é bem aproveitada, visto que o protocolo MMSPEED originalmente faz uso de caminhos múltiplos apenas para aumentar a confiabilidade da entrega de um dado através da redundância. Tal operação multi-caminhos não é adequada para a maioria das RSSFMs, pois o tráfego é muito pesado e não permite um grau elevado de redundância. Ao invés disso, os caminhos múltiplos deveriam, idealmente, ser utilizados como meio de aumentar a banda disponível para a transmissão de dados.

### 3.1.5 AntSensNet

Em [8], Cobo et. al propõem o algoritmo de roteamento multi-QoS inspirado em colônias de formigas, chamado AntSensNet. As técnicas baseadas em colônias de formigas são formas de inteligência de enxame, que têm como princípio a cooperação entre agentes simples para solucionar problemas complexos. No roteamento, os agentes podem encontrar e otimizar rotas através da técnica de aprendizado por reforço. Dado o objetivo de alcançar o destino, o sistema adota uma abordagem de tentativa e erro na qual os agentes deixam feromônios por onde eles passam, ou seja, indicadores da rota utilizada. Assim, à medida que agentes passam pela mesma rota, a quantidade de feromônios é aumentada. Entretanto, os feromônios em uma rota diminuem com o passar do tempo. Se uma rota for invalidada, os feromônios podem indicar rotas alternativas, dado que os agentes exploram rotas diferentes continuamente. Desta forma, o AntSensNet é um protocolo hierárquico que escolhe rotas adequadas considerando diversos requisitos de QoS, aumentando o uso da rede e melhorando seu desempenho.

Considerando que a quantidade de agentes na rede é proporcional ao número de nós, o protocolo emprega uma abordagem hierárquica para garantir a escalabilidade, elegendo líderes com base em suas capacidades de *hardware*. Essa abordagem também permite a agregação de dados, diminui o consumo de energia, a latência nas transmissões, e o número de colisões entre nós de um mesmo agrupamento. Um esquema de rotação de líderes permite aumentar o tempo de vida da rede e, com o uso dos grupos, o roteamento baseado em colônias de formigas se dá apenas entre os nós líderes.

De acordo com o AntSensNet, diversos critérios podem ser utilizados como parte dos requisitos de QoS em uma transmissão de dados, e os nós possuem tabelas com dados referentes às rotas que podem ser estabelecidas com cada um de seus vizinhos. Esses dados compreendem: (i) energia mínima de um nó na rota; (ii) memória disponível mínima em um nó da rota; (iii) latência acumulada; (iv) taxa de perda de pacotes acumulada. Cada um destes critérios possui um valor de feromônio, que indica o quão apropriado é aquele caminho para o critério em questão. Tais fatores podem ser combinados a fim de estabelecer o QoS necessário para a aplicação.

Para transmitir os dados, o protocolo utiliza diversos agentes, como FANT, BANT,

MANT, DANT, VFANT, VBANT. Em uma transmissão normal, o líder encaminhador inicialmente verifica se algum de seus vizinhos oferece o QoS necessário através da avaliação dos critérios. Caso o QoS não seja satisfeito, é iniciado o procedimento de descoberta de rotas. O líder origem cria agentes FANT (*Forward ANT*), a fim de estabelecer rotas de feromônio até a estação-base. Na Figura 3.5, à esquerda, é requisitada uma rota que atenda os requisitos: (i) menor energia na rota superior a 17j; (ii) tempo de latência inferior a 3.0s; (iii) taxa de perda dos pacotes inferior a 2%; (iv) menor memória disponível na rota superior a 30kb.

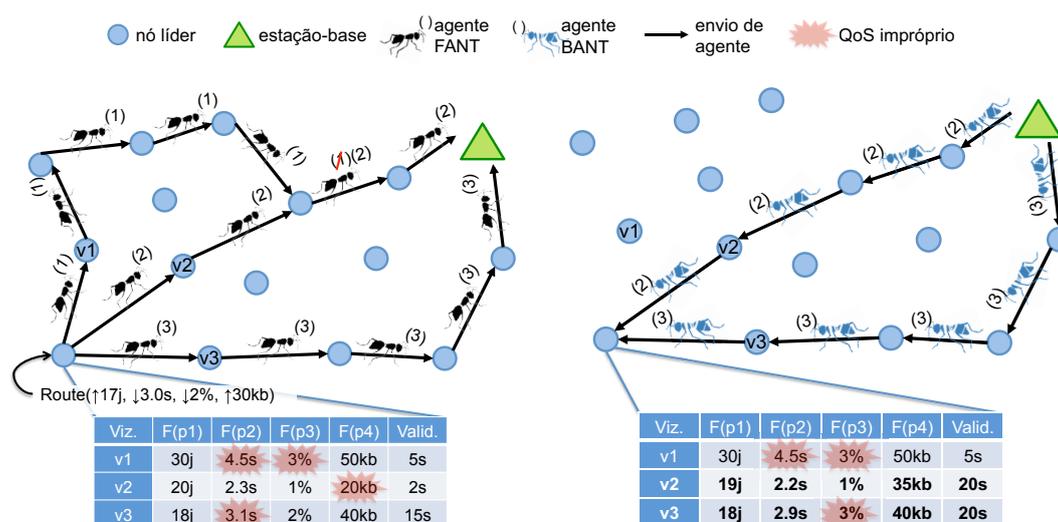


Figura 3.5: AntSensNet: Envio de agentes FANT e resposta através de agentes BANT

Ao receber um agente FANT, o líder verifica se este agente possui algum *loop* no caminho realizado, podendo eliminar nós redundantes. O líder inclui no agente suas informações de energia, memória, latência e taxa de perda de pacotes, e o encaminhará para um líder vizinho, escolhido por uma função de probabilidade que considera todos os critérios de QoS utilizados. Caso um líder receba mais do que um agente, os demais serão descartados. Atingindo a estação-base, as informações carregadas pelo agente são combinadas e avaliadas em relação aos requisitos de QoS.

Caso a rota seja adequada, o agente FANT será destruído e um agente BANT (*Backward ANT*) gerado, como à direita da Figura 3.5. Esse agente percorre o caminho inverso ao utilizado pelo agente FANT, com todas as informações de QoS pertinentes ao caminho. Ao receber um agente BANT, as informações carregadas nele serão utilizadas para atualizar os valores dos feromônios nas tabelas dos líderes intermediários e, com isso, a probabilidade de roteamento pelo dado caminho; os demais caminhos terão seus feromônios diminuídos. Quando o agente BANT atingir o líder que solicitou a rota, sua tabela será atualizada e o agente BANT destruído.

Ao final do processo, haverá um caminho apropriado para a transmissão, indicado pelas maiores concentrações de feromônios nos critérios que satisfazem os padrões de

QoS solicitados. Durante a transmissão de dados, agentes FANT ainda serão enviados periodicamente para realizar possíveis atualizações nas rotas. Além disso, agentes do tipo MANT (*Maintenance ANT*) são empregados para notificar os nós de problemas de congestionamentos ou de quebras de enlaces, também atualizando as suas tabelas de feromônios.

Agentes do tipo DANT (*Data ANT*) são utilizados para a transmissão urgente de um dado. Eles são agentes de maior prioridade, com comportamento similar ao dos agentes FANT, sendo utilizados para envio direto de dados sem a confirmação das rotas. Para a transmissão de vídeo simultânea por múltiplos caminhos disjuntos, agentes VFANT (*Video FANT*) são usados para descoberta das rotas. A diferença é que um líder não descartará agentes VFANT, independente de quantos receba; ao final do processo, agentes VBANT (*Video BANT*) serão utilizados para informar as rotas. A origem então filtrará os caminhos informados pelos agentes VBANT, selecionando apenas caminhos disjuntos.

O protocolo AntSensNet apresentou melhoras na qualidade do vídeo recebido e em todos critérios considerados para o QoS. Porém, embora os caminhos sejam escolhidos com base nestas métricas, não existe um esquema robusto de priorização individual de pacotes, visto que o tratamento deles é sempre o mesmo. O protocolo usa os agentes DANT para o envio prioritário, mas tais agentes não são adequados para o envio de dados multimídia, por causar grande redundância no envio e não suportar múltiplas rotas para aumento de banda. Além disso, a busca por rotas não possui otimizações para a exploração de rotas disjuntas. A operação consiste da requisição de rotas sem bloquear os nós já utilizados para, só ao final, selecionar as rotas disjuntas entre si.

### 3.1.6 Discussão

A Tabela 3.1 resume as características dos protocolos de roteamento estudados. O suporte ao *roteamento geográfico* permite a simplificação de diversas operações de roteamento, com o custo colateral do equipamento GPS ou do *overhead* imposto pelas mensagens usadas por algoritmos de localização. A *priorização robusta de pacotes* é necessária para aplicações multimídia, pois é comum as codificações utilizadas criarem diversos subfluxos de prioridades diferentes. Nestas, os pacotes possuem importância diferentes, que refletem diretamente na qualidade dos dados multimídia recebidos no destino final. A *organização hierárquica* dos nós possibilita maior escalabilidade da rede, além de limitar o número de transmissões e permitir o uso de técnicas de agregação de dados. Já a *diferenciação dos quadros de vídeo* permite otimizações para o tipo de vídeo ou de fluxo considerados. Entretanto, isso acontece com o custo da perda de generalidade do protocolo, que se torna muito específico e até mesmo dependente da aplicação.

Além disso, a coluna *Multi-caminho* da tabela descreve a abordagem multi-caminhos utilizada e a última coluna indica a razão das rotas selecionadas para o roteamento. Os

Protocolo de roteamento	Geo-graf.	Suporta ≠ priori.	Hie-rar.	Quadros vídeo ≠	Multi-caminho	Propósito das rotas utilizadas
TPGF (2010)	✓	–	–	–	subfluxos simultâneos	menor caminho até o destino
AGEM (2010)	✓	–	–	–	um fluxo alternando rotas	balancear consumo de energia entre rotas
NAMVD (2010)	–	✓	–	✓	subfluxos simultâneos	escalonamento por multi-prioridades
MA-MMSPEED (2009)	✓	✓	–	✓	confiabilidade (redundância)	camadas de ≠ velocidades e confiabilidades
AntSensNet (2010)	–	–	✓	–	subfluxos simultâneos	garantir QoS através de diversas métricas

Tabela 3.1: Tabela comparativa das características dos protocolos de roteamento

protocolos TPGF, NAMVD, e AntSensNet utilizam da abordagem multi-caminhos para quebrar a transmissão de um fluxo de vídeo em diversos subfluxos e, dessa maneira, o uso da banda disponível é otimizado. Por outro lado, o protocolo AGEM utiliza múltiplos caminhos em alternância para balancear o consumo de energia. O protocolo MA-MMSPEED é baseado em uma terceira abordagem multi-caminhos, que usa da redundância dos dados para aumentar a confiabilidade.

Como desvantagens individuais de cada protocolo, o TPGF considera apenas a distância em saltos para a criação das rotas, e as cria muito próximas uma da outra, aumentando a probabilidade de interferência e colisões. O protocolo AGEM emprega mudanças nas rotas para balancear as rotas, entretanto, tais mudanças não ocorrem de maneira eficaz em ambientes estáticos. O NAMVD depende da operação de outro protocolo de roteamento para a exploração das rotas. O MA-MMSPEED não se preocupa com otimizações no uso de energia. O protocolo AntSensNet tem suporte limitado à transmissões por vários caminhos disjuntos, pois ele se baseia na seleção de caminhos disjuntos a partir de uma busca comum.

## 3.2 Técnicas multimídia na camada de transporte

Diversas técnicas têm sido empregadas em nível de transporte para otimizar as transmissões multimídia. As necessidades envolvem o tratamento rápido e eficiente dos congestionamentos e a recuperação de dados. Dessa forma, protocolos nessa camada normalmente utilizam técnicas de compressão ou controle de geração de tráfego para o tratamento de congestionamentos, e codificações ou solicitações explícitas para a recuperação de dados. A seguir, são descritos quatro destes protocolos.

### 3.2.1 M-DTSN

Mingorance et al. propõem um mecanismo [20] para melhorar as transmissões de vídeo em tempo real em RSSFMs, para protocolos de transporte que se preocupam com a

confiabilidade dos dados. Tal mecanismo consiste em criar espaços de tempo, dentro dos quais uma certa quantidade de informação deve ser enviada, e estimar se as condições do canal permitem que a transmissão seja realizada adequadamente dentro deste intervalo. A técnica proposta pelos autores pode ser utilizada em conjunto com qualquer protocolo de transporte que provenha recuperação dos dados. Para demonstrar o funcionamento, os autores propuseram o M-DTSN [20], utilizando como base o protocolo DTSN, proposto por Bruno et al. em [18].

O DTSN utiliza sessões simbólicas para transmissão de dados, definidas pela tupla  $\langle \text{nó origem}, \text{nó destino}, \text{identificador da aplicação}, \text{número de sessão} \rangle$ . Uma sessão é criada quando um pacote é transmitido pela primeira vez para um nó destino, e ela é destruída após um tempo pré-determinado sem nenhuma transmissão na sessão. O protocolo DTSN emprega um método onde o transmissor dos dados é responsável por solicitar mensagens de confirmação ACK e NACK, que indicam o sucesso da transmissão ou quais pacotes foram perdidos, respectivamente. A origem de uma transmissão possui uma **janela de confirmação**, que é definida como o número de pacotes que devem ser transmitidos antes da solicitação de uma mensagem de confirmação.

Para diminuir a latência e o consumo de energia da recuperação dos dados, os nós intermediários em uma transmissão guardam os pacotes enviados de acordo com uma probabilidade pré-estipulada. Assim, em caso de perda de pacotes, o pacote estará guardado mais próximo do nó destino e menos saltos serão necessários para a recuperação. Ao receber um NACK que indique um pacote armazenado no nó atual, ele irá remover da mensagem NACK o identificador do pacote solicitando e encaminhar a mensagem ao nó origem, enviando o pacote em questão para o nó destino. O protocolo DTSN oferece também possibilidades que permitem graus intermediários de confiabilidade, como visto em [18].

O mecanismo proposto por Mingorance et al. faz uso do conhecimento sobre a taxa de geração de dados da aplicação e considera a intolerância à latência das RSSFM de tempo real. Em uma transmissão em tempo real, o quadro de uma imagem deve ser recebido antes do momento no qual ele será renderizado. Assim, se o transmissor de dados inferir que o dado a ser enviado chegará no receptor antes do momento de renderização, o quadro deve ser enviado; caso contrário, é melhor descartá-lo já na origem.

Observamos na Figura 3.6 uma transmissão, para cada um dos protocolos, dos quadros  $q1$ ,  $q2$  e  $q3$ , sendo que cada um deve ser renderizado antes dos instantes  $t(q1)$ ,  $t(q2)$  e  $t(q3)$ , respectivamente. Quando a transmissão de um quadro passa do tempo limite de renderização, ela se torna inútil e pode ser descartada, poupando recursos da rede e possibilitando a transmissão dos próximos quadros. No DTSN normal essa política não é empregada e, por isso, diversos quadros são inutilmente transmitidos após o tempo de renderização.

O protocolo proposto foi capaz de aumentar a qualidade do vídeo recebido no nó

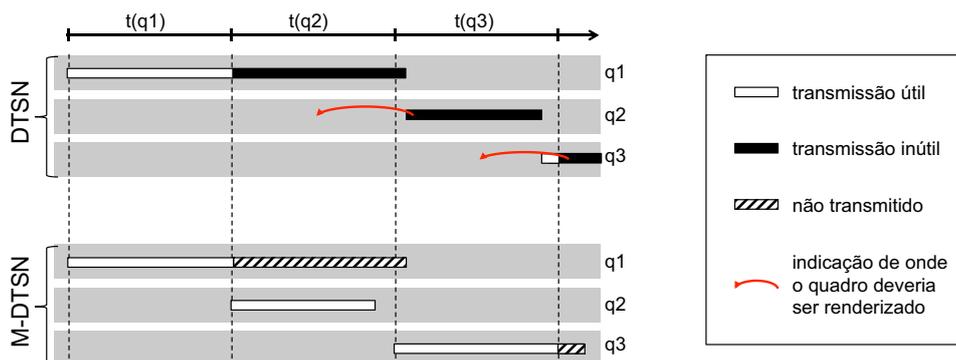


Figura 3.6: Envio de quadros vs. tempo de renderização para DTSN e M-DTSN

destino em termos da taxa de quadros completos recebidos, além de otimizar o uso da banda disponível na rede através do descarte dos pacotes inúteis. Deve-se ressaltar que a contribuição dos autores foi o mecanismo em si, que pode ser incorporado por outros protocolos de transporte. Entretanto, este mecanismo por si só não provém a confiabilidade dos dados ou o controle do congestionamento da rede e, embora propicie uma melhora considerável na qualidade do vídeo recebido e no uso da banda disponível, seu uso é voltado apenas para redes que operam com aplicações de fluxos em tempo real.

### 3.2.2 MMDR

Em [24], Qaisar et al. propuseram a arquitetura MMDR (*Multi-path Multi-stream Distributed Reliability*), que visa melhorar a qualidade de vídeos transmitidos e balancear o consumo de energia entre os nós da rede. A arquitetura foi idealizada para a operação conjunta com protocolos de roteamento multi-caminhos, e consiste de três procedimentos maiores: codificação do vídeo em vários subfluxos, juntamente com a codificação LDPC dos subfluxos para correção de erros; escolha de múltiplos caminhos para balanceamento de energia e resistência à erros; decodificação parcial do código LDPC nos nós intermediários, para recuperação progressiva dos erros induzidos pelos canais.

Os **códigos LDPC** (*Low Density Parity Check*) são códigos de correção de erros lineares construídos a partir de um grafo bipartido. Eles podem ser parcialmente decodificados iterativamente diversas vezes, permitindo a correção de *bits* errados no pacote. A Figura 3.7(a) mostra a representação gráfica de uma codificação possível para a seqüência 110100, aonde cada *bit* é representado por um nó de variável (NVa). Os nós verificadores (NVes) servem para detectar e corrigir erros, tendo como princípio que os nós de variáveis ligados a um nó verificador devem possuir soma binária igual a zero.

O código LDPC pode ser parcialmente decodificado ao realizar um número limitado de iterações de checagem e correção de erros, dado que cada iteração corresponde à checagem de um dos nós verificadores e possíveis correções de *bits* errados. A representação matricial do grafo é utilizada para a checagem de erros. Uma seqüência de *bits* está correta se a

multiplicação dela pela matriz contendo os *bits* da mensagem for igual à uma matriz nula, como visto na Figura 3.7(b).

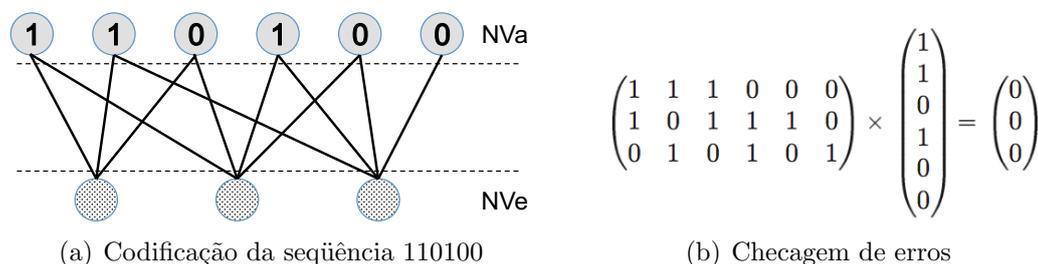


Figura 3.7: Codificação LDPC

No MMDR, os nós origem de tráfego enviam os pacotes dos subfluxos juntamente com seus códigos LDPC. Caso o protocolo de roteamento provenha informações sobre taxas de erro nos caminhos, elas serão levadas em consideração na escolha nas rotas. Além disso, para balancear ainda mais o consumo de energia entre as diversas rotas disjuntas, um subfluxo pesado em termos de quantidade de dados pode ser quebrado novamente em outras sub-rotas.

Essa abordagem multi-fluxos é apropriada para diversas codificações de vídeo possíveis, como *Layered Coding* (LC), *Predictive Video Coding* (PVC), *Multiple Description Coding* (MDC) ou *Distributed Video Coding* (DVC). Em técnicas LC, por exemplo, existe um fluxo de dados que compõem uma camada básica e principal do quadro atual do vídeo e diversos outros fluxos de menor importância, cuja função é melhorar a qualidade dos quadros base transmitidos.

Os nós das rotas utilizadas para a transmissão do fluxo de vídeo cooperam em pares, em uma relação alternante do tipo mestre/escravo, sendo que os nós mestres serão responsáveis por determinar as tarefas de iteração na decodificação parcial do código LDPC para checagem e correção de erros. O número de iterações em um nó depende da probabilidade de erro do canal do nó em questão - nós com maiores probabilidades de erro realizarão mais iterações.

A técnica utilizada pela arquitetura de transporte MMDR consiste da recuperação progressiva de erros através da codificação LDPC e iterações de decodificação parcial. Ela diminuiu consideravelmente a taxa de erro por *bit* nos pacotes de transmissões de vídeo recebidos no destino final, melhorando assim a qualidade do vídeo em termos de PSNR. Contudo, a codificação LDPC e suas decodificações parciais em nós intermediários consomem mais energia para o processamento dos dados. Finalmente, a arquitetura MMDR também não provém nenhum esquema de controle de congestionamento na rede, podendo resultar em maiores taxas de erro por estouros de filas.

### 3.2.3 QCCP-PS

As aplicações multimídia geram quantidades massivas de tráfego na rede, necessitando de grande largura de banda para a transmissão de dados. A partir disso, a emergência de congestionamentos se torna algo comum, prejudicando os requisitos de QoS da RSSFM. Em [34], Yaghmaee e Adjeroh propuseram o protocolo QCCP-PS, utilizado para controle de congestionamento através de análises de tamanhos de filas nos nós. O protocolo também suporta a priorização de pacotes, através de uma política baseada em filas de prioridades para diferentes classes de tráfego multimídia. O trabalho foi estendido em [35] para um estudo mais abrangente que apresenta separadamente apenas a técnica utilizada, não incorporada a um protocolo de transporte.

O mecanismo utilizado possui como componentes maiores a Unidade de Diferenciação de Serviço (UDS) e a Unidade de Controle de Congestionamento (UCC). A UDS categoriza os tráfegos de acordo com suas importâncias e significados, criando classes de tráfego que podem variar de acordo com a aplicação. No estudo apresentado, foram utilizadas a classe de encaminhamento rápido, para fluxos em Tempo Real (TR), e classes de menor prioridade para tráfegos que Não têm requisitos de Tempo Real (NTR).

Para garantir a baixa latência de tráfegos TR, os pacotes dele são armazenados em uma fila separada de menor tamanho, enquanto as classes NTR são controladas de acordo com o algoritmo de gerenciamento ativo de filas do protocolo RED [12]. Cada classe possui uma fila de pacotes e, para cada fila, existem dois valores limite. Quando a fila tem tamanho inferior ao mínimo, não existe congestionamento na fila e a taxa de transmissão de dados pode ser aumentada. Quando a taxa é superior a um patamar máximo, existe congestionamento na fila e, neste caso, a taxa de transmissão dos dados deve ser diminuída. Tais informações são expressas em um **índice de congestionamento**.

Cada classe de tráfego possui um valor de Prioridade de Classe (PC) definido pela aplicação, e a **Prioridade de Classe de Tráfego** de um Nó (PCTN) corresponde ao somatório das PCs dos tráfegos que passam por esse nó. A **Prioridade Individual** (PI) de um nó é calculada levando em consideração sua PCTN e sua Prioridade Geográfica (PGeo), que define a importância dos nós em uma determinada região. Finalmente, a **Prioridade Global** (PG) de um nó é calculada através da soma de sua PI com a PG dos nós que o utilizam para encaminhar dados.

Na Figura 3.8, a PCTN do nó  $a$  corresponde a soma da prioridade de um tráfego TR=5 e um tráfego NTR=1, totalizando  $PCTN(a)=1*TR+1*NTR=6$ . A PI do nó  $a$  corresponde à  $PCTN=6$  multiplicada pela  $PGeo=1$ , totalizando  $PI(a)=PCTN(a)*PGeo(a)=6$ . Finalmente, a PG do nó  $a$  corresponde à sua  $PI=6$ , somada à PG dos nós que utilizam o nó  $a$  para transmissão dos dados, ou seja, a  $PG(b)=5$  e  $PG(c)=1$ , totalizando  $PG(a)=PI(a)+PG(b)+PG(c)=12$ .

O funcionamento da UCC é dividido nas sub-Unidades de Detecção de Congestiona-

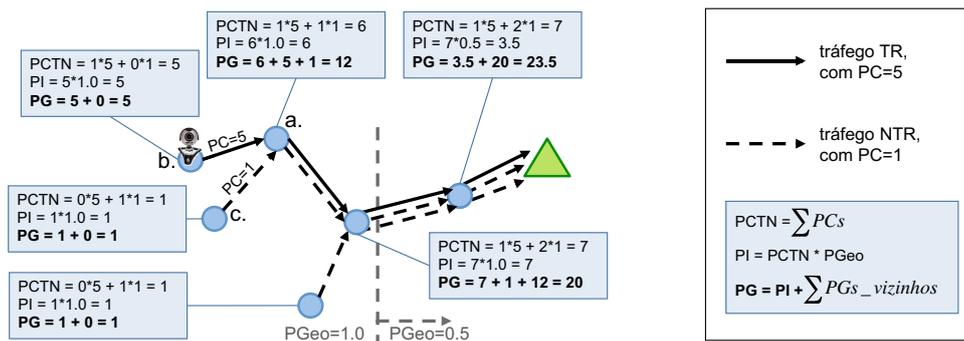


Figura 3.8: Cálculo das prioridades do QCCP-PS

mento (UDC), Ajuste de Transmissão (UAT) e Notificação de Congestionamento (UNC). A UDC mede e analisa a taxa de recebimento de pacotes, gerando um **índice de carga** do nó que é utilizado para detectar congestionamentos. A cada intervalo de tempo, a UAT do nó calculará qual deve ser a taxa de transmissão dele e dos nós que o utilizam para encaminhar seus dados, levando em consideração o índice de congestionamento das filas, o índice de carga do nó e a PG dos nós que estão gerando tráfego. Caso taxas de transmissão precisem mudar, a UNC notificará a nova taxa de transmissão dos nós em questão, a fim de diminuir o tráfego para aliviar o congestionamento.

O protocolo QCCP-PS apresentou latência menor nas transmissões, quando comparado a outros protocolos de transporte. Além disso, a política de controle do congestionamento tornou a probabilidade de perda de um pacote muito menor, chegando quase a zero na classe de tráfego de maior prioridade. Entretanto, o mecanismo utilizado pelo protocolo QCCP-PS não realiza controle na confiabilidade dos dados, e foi proposto considerando que o protocolo de roteamento opera apenas com uma rota. Assim, otimizações que consideram os múltiplos caminhos possivelmente encontrados não são realizadas.

### 3.2.4 ACT

Em [17], Lee e Jung propõem o protocolo ACT para o controle de congestionamentos, baseado na compressão adaptativa de dados. São utilizados em conjunto os métodos de compressão *Discrete Wavelet Transform* (DWT), *Adaptive Differential Pulse Code Modulation* (ADPCM), e *Run-Length Coding* (RLC). A técnica proposta considera que as políticas de controle de congestionamento existentes normalmente são baseadas no descarte de pacotes ou na diminuição da taxa de transmissão dos dados. Ambas estas políticas, apesar de eficientes em energia, acabam denegrindo a fidelidade do evento reportado ao diminuir a qualidade do vídeo transmitido.

A arquitetura do protocolo ACT consiste nos módulos de **Compressão Adaptativa de Pacotes** (CAP) e de **Controle Adaptativo de Taxas** (CAT), e é ilustrada na Fi-

gura 3.9<sup>4</sup>. O CAP aplica pro-ativamente as técnicas de compressão com um fator inferior, a fim de diminuir o tráfego para evitar congestionamentos. Inicialmente, diversos pacotes são agrupados em uma matriz quadrada. Então o DWT é utilizado para transformar os dados do domínio de tempo para domínio de frequência, dividindo a matriz em subpartes. Estas partes provêm diferentes prioridades aos dados comprimidos, criando áreas de descrição base de imagem, e áreas para refinamento de detalhes. Após a aplicação do DWT, o ADPCM é utilizado para diminuir o espaço dos dados, em um processo de quantização. Finalmente, a quantidade de pacotes a ser transmitida é diminuída com o uso do RLC, que gera um número inferior de pacotes para um dado de menor prioridade.

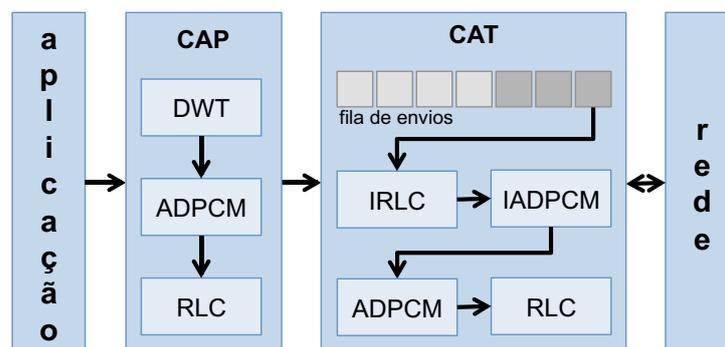


Figura 3.9: Arquitetura do protocolo ACT

O CAT controla a taxa de saída dos pacotes através da recodificação dos pacotes presentes na fila de envio de um nó. Em caso de congestionamento, tais pacotes serão descomprimidos, através dos métodos IRLC e IADPCM, e recodificados com um fator de compressão maior no passo de quantização do ADPCM. Esse fator depende diretamente do grau de congestionamento do nó e é responsável pela diminuição do tráfego. Caso tal medida não elimine o congestionamento, o nó poderá também aumentar o intervalo entre suas transmissões ou descartar pacotes em situações extremas. No descarte, são consideradas as prioridades estabelecidas pelo DWT, tentando garantir uma qualidade mínima para o vídeo.

O protocolo ACT foi comparado a outros protocolos de transporte com foco em tratamento de congestionamentos, e apresentou melhor desempenho da rede quanto à capacidade de transmitir dados até o destino final, e à taxa de entrega dos pacotes. O tráfego também se mostrou mais balanceado, pois ele reduziu o número de pacotes presentes na rede e trata do problema de congestionamento de maneira mais rápida com a sua abordagem baseada em compressão de dados. Entretanto, foi introduzido um custo de energia que corresponde ao processamento dos algoritmos de compressão. Além disso, o mecanismo proposto não possui um suporte robusto à prioridades individuais de fluxos de vídeo distintos, e não se preocupa com a confiabilidade dos dados.

<sup>4</sup>A figura ilustra o funcionamento do protocolo nos sentidos aplicação-para-rede e rede-para-rede (transmissão de um nó para outro)

### 3.2.5 Discussão

A Tabela 3.2 resume as características dos protocolos de transporte estudados, em termos de suporte ao *controle de congestionamento*, à *confiabilidade*, à *priorização robusta de pacotes*. Já a coluna *Base conceitual* apresenta a idéia na qual o funcionamento do protocolo foi inspirado.

Protocolo de transporte	Controle congest.	Confiabilidade	Suporta $\neq$ priori.	Base conceitual
M-DTSN (2010)	–	✓	–	evitar a transmissão de dados inúteis (prazo de entrega)
MMDR (2009)	–	✓	–	correção de erros por codificação LDPC dos fluxos
QCCP-PS (2008)	✓	–	✓	controle de congestionamento com priorização de tráfegos
ACT (2010)	✓	–	–	controle de congestionamento por compressão dos dados

Tabela 3.2: Tabela comparativa das características dos protocolos de transporte

O controle de congestionamento é uma operação essencial para as RSSFMs. Sem tal controle, além de denegrir a taxa e o tempo de entrega das mensagens, o congestionamento também aumenta o consumo de energia dos nós, devido ao número alto de reenvios das mensagens. A confiabilidade dos dados deve garantir um patamar tolerável de qualidade no vídeo recebido no destino final, mesmo que a recuperação seja apenas parcial. O suporte à priorização robusta de pacotes exerce outro papel essencial, visto que várias técnicas de processamento de dados multimídia consistem em quebrar o quadro multimídia em subfluxos de diferentes importâncias.

Com relação às características individuais de cada protocolo, a contribuição do M-DTSN não é o protocolo em si, mas o mecanismo utilizado para estender o DTSN, que impede a transmissão de dados fora do prazo de renderização. O protocolo MMDR utiliza a codificação LDPC dos fluxos de dados e iterações de decodificação parcial, corrigindo os erros progressivamente. Contudo, um consumo de energia adicional foi introduzido no processamento. O QCCP-PS realiza a categorização de tráfegos em classes de diferentes prioridades, com isso realizando o controle de congestionamento baseado no ajuste da taxa de transmissão. Todavia, o protocolo considera o uso de apenas uma rota para transmissão de dados no roteamento. Em ACT, os autores propuseram uma técnica de controle de congestionamento baseada na compressão dos dados, proporcional ao grau de congestionamento. Entretanto, o protocolo introduz um custo de energia moderado para processamento de dados.

### 3.3 Técnicas multimídia com abordagens *cross-layer*

Diversas técnicas têm sido empregadas em abordagens *cross-layer* entre as camadas de transporte e de rede para otimizar as transmissões multimídia. As necessidades que devem ser tratadas envolvem o estabelecimento de rotas, controle de congestionamento e recuperação de dados. Dessa forma, tais abordagens normalmente se aproveitam da interação entre essas camadas para otimizar o funcionamento da camada de rede através da camada de transporte, auxiliando na seleção das rotas. A seguir, são descritos os dois que mais explicitamente utilizam abordagens *cross-layer* das camadas estudadas.

#### 3.3.1 MPMP

Em [29], Shu et al. propõem o protocolo *cross-layer* MPMP. Seu funcionamento tem como objetivo melhorar a capacidade de descrição dos eventos monitorados. O protocolo MPMP é sensível ao contexto, considerando que um fluxo de vídeo é composto por subfluxos de imagens e de áudio e que a importância destes subfluxos pode variar. Em uma aplicação de monitoramento de incêndios, o subfluxo de imagens é mais importante, já em uma aplicação de monitoramento de oceanos profundos, o subfluxo de áudio é mais importante pois o ambiente é extremamente quieto. Até mesmo em uma mesma aplicação essas importâncias podem variar. A política *cross-layer* utilizada consiste em selecionar na camada de transporte o número adequado de caminhos disjuntos explorados na camada de rede, considerando a prioridade dos subfluxos.

Para suportar o conceito de sensibilidade ao contexto, o protocolo MPMP criou a métrica *valor da informação*, que deve ser maximizada. Essa métrica considera a relação entre os subfluxos de vídeo e de áudio, suas prioridades e o número máximo de caminhos que podem ser alocados a cada um dos subfluxos, levando em consideração as restrições de latência máxima. Além disso, é assumido que o subfluxo de menor prioridade tem maior tolerância à latência, podendo utilizar caminhos inválidos para o subfluxo prioritário.

Na camada de rede, o protocolo TPGF [28] (visto na subseção 3.1.1) foi utilizado para a exploração dos múltiplos caminhos disjuntos, obtendo também a latência fim-a-fim de cada um dos caminhos. Após a exploração dos caminhos, o algoritmo de seleção de caminhos CAMS, proposto pelos autores, é utilizado para escolher o número máximo de rotas disjuntas para maximizar o *valor da informação* de um fluxo de vídeo, garantindo a obediência das restrições de latência fim-a-fim. O algoritmo CAMS funciona de acordo com as seguintes regras:

- quando a latência de nenhum caminho satisfaz a latência tolerada, nada é enviado;
- quando a latência de todos os caminhos satisfaz a latência tolerada, o subfluxo prioritário é alocado primeiro e então o subfluxo menos importante;

- quando a latência de apenas alguns caminhos satisfaz a latência tolerada, o subfluxo prioritário é alocado primeiro, e é considerada uma maior tolerância de latência para a alocação do subfluxo de menor prioridade.

Tais regras são aplicadas para alocação do maior número de caminhos possíveis para o subfluxo prioritário e secundário, respectivamente, como visto na Figura 3.10.

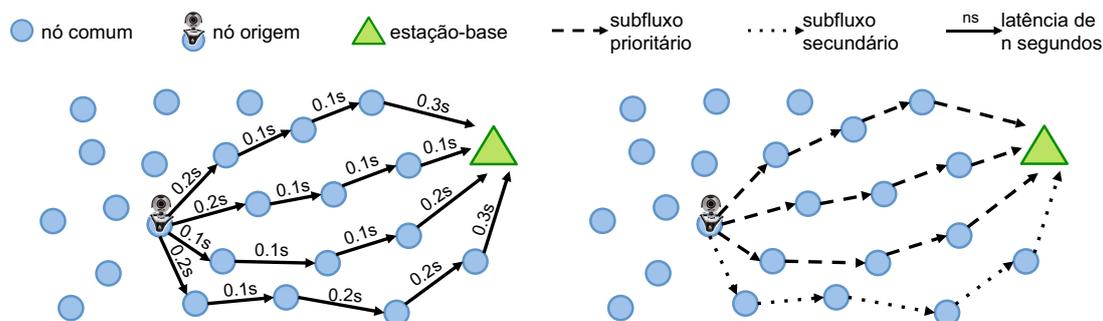


Figura 3.10: Alocação de rotas para subfluxos prioritário e secundário no MPMP

O protocolo MPMP aumentou a quantidade de dados úteis (recebidos dentro do prazo) e também obteve um maior *valor da informação* nos dados recebidos na estação-base. Entretanto, a priorização dos subfluxos não ocorre de maneira robusta. Ela considera apenas dois tipos de tráfego pré-definidos e, além disso, o subfluxo de maior prioridade sempre será alocado com prioridade absoluta, não permitindo realizar uma ponderação nas prioridades. Ademais, a camada de transporte foi desvirtuada nessa abordagem *cross-layer*, ao deixar de realizar tarefas básicas e desejáveis da camada de transporte para as RSSFMs, como o controle de congestionamento ou a recuperação de erros. Finalmente, como o TPGF é utilizado como base de roteamento para o protocolo MPMP, ele herda todos seus defeitos.

### 3.3.2 RRA

O protocolo RRA [27] foi criado visando as aplicações de RSSFM que têm um tempo de vida predefinido. Este tipo de RSSFM é caracterizado principalmente pela necessidade de enviar para a estação-base a maior quantidade possível de dados dentro do tempo mínimo predefinido, a fim de cobrir efetivamente a ocorrência de um evento de importância. Como exemplos desse tipo de rede temos aplicações de resgate em cenários de desastres repentinos e monitoramento de atividades raras, como a erupção de vulcões.

O protocolo estabelece como objetivos maximizar a quantidade de dados coletados e minimizar a latência fim-a-fim, operando de maneira *cross-layer* entre as camadas de enlace, rede e transporte. Para isso, são criadas diversas relações e restrições algébricas entre os parâmetros utilizados na otimização dos objetivos. Com essas considerações, o raio de

transmissão dos nós é otimizado na camada de enlace, e as camadas de rede e transporte operam de maneira conjunta, otimizando a seleção das rotas disjuntas utilizadas.

É demonstrado que os objetivos do protocolo entram em conflito no momento de definir o raio de transmissão a ser utilizado; quanto menor o raio de transmissão, maior a quantidade de dados que pode ser coletada e maior a latência fim-a-fim, quanto maior o raio de transmissão, menor a quantidade de dados que pode ser coletada e menor a latência fim-a-fim. Dessa maneira, o raio de transmissão dos nós e a taxa de geração de dados são parâmetros críticos na performance da coleta de dados. O protocolo utiliza o maior raio de transmissão possível, tal que o tempo de vida esperado da rede não seja inferior ao tempo de vida mínimo predefinido.

Na camada de rede, o protocolo TPGF [28] (visto na subseção 3.1.1) é utilizado para a exploração das rotas disjuntas operando com o raio de transmissão definido pela camada de enlace, tal que a quantidade de saltos das rotas descobertas é inversamente proporcional ao raio de transmissão utilizado. A camada de transporte é responsável por selecionar o maior número de rotas disjuntas fornecidas pela camada de rede, tal que as restrições de latência dos fluxos não sejam quebradas.

O protocolo RRA aumentou a quantidade de dados coletados pela estação-base, apresentando um estudo detalhado de como o raio de transmissão máximo utilizado influencia na quantidade de dados coletados e na latência fim-a-fim das rotas. Entretanto, esse protocolo desvirtua os propósitos principais da camada de transporte, utilizando ela de maneira superficial para a seleção de rotas e considerando como métrica de QoS apenas a latência. Além disso, nenhum suporte à priorização de fluxos é oferecido e todos os defeitos do TPGF são herdados, ao utilizar ele para explorar as rotas disjuntas utilizadas.

### 3.3.3 Discussão

A Tabela 3.1 resume as características dos protocolos com abordagens *cross-layer* entre rede e transporte, em termos de suporte ao *roteamento geográfico*, à *organização hierárquica*, ao *roteamento simultâneo por múltiplos caminhos*, ao *controle de congestionamento*, à *confiabilidade* e à *priorização robusta de pacotes*. Já a coluna *Base conceitual* apresenta a idéia na qual o funcionamento do protocolo foi inspirado.

Protocolo <i>cross-layer</i>	Geo- graf.	Hie- rar.	Multi- caminhos	Controle congest.	Confia- bilidade	Suporta ≠ priori.	Base conceitual
MPMP (2010)	✓	–	✓	–	–	–	considera contexto (subfluxos áudio/imagem)
RRA (2010)	✓	–	✓	–	–	–	maximizar coleta de da- dos dentro de um tempo

Tabela 3.3: Tabela comparativa das características dos protocolos *cross-layer*

Considerando a camada de rede, o roteamento geográfico permite a simplificação de

diversas operações de roteamento, com o custo colateral do equipamento GPS ou do *overhead* imposto pelas mensagens usadas por algoritmos de localização. A organização hierárquica dos nós possibilita maior escalabilidade da rede, além de limitar o número de transmissões e permitir o uso de técnicas de agregação de dados. O roteamento simultâneo por múltiplos caminhos quebra a transmissão de um fluxo de vídeo em diversos subfluxos e, desta maneira, o uso da banda disponível é otimizado.

Na camada de transporte, o controle de congestionamento é uma operação essencial para as RSSFMs. Sem tal controle, além de denegrir a taxa e o tempo de entrega das mensagens, o congestionamento também aumenta o consumo de energia dos nós, devido ao elevado número de reenvios das mensagens. A confiabilidade dos dados é necessária para garantir um patamar tolerável de qualidade no vídeo recebido no destino final, mesmo que a recuperação seja apenas parcial. O suporte à priorização robusta de pacotes é também essencial, visto que várias técnicas de processamento de dados multimídia consistem em quebrar o quadro multimídia em subfluxos de diferentes importâncias.

Com relação às características individuais de cada protocolo, o protocolo MPMP introduziu um mecanismo que divide o fluxo de vídeo em subfluxos de áudio e de imagem, através da métrica proposta *valor da informação*. Foi criado um serviço de priorização, contudo, ele permite apenas selecionar qual o subfluxo prioritário dentro de um fluxo, sem priorizações ponderadas ou diferenciação de prioridade na captura de diferentes fluxos. O protocolo RRA aumentou a quantidade de dados coletados na estação-base, apresentando um estudo detalhado de como o raio de transmissão máximo utilizado influencia na quantidade de dados coletados e na latência fim-a-fim. Finalmente, os dois protocolos são construídos com base no TPGF, e herdaram as suas características negativas. Ademais, ambos desvirtuam a camada de transporte, sem realizar controle de congestionamento ou garantir algum nível de confiabilidade.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) compreendem uma tecnologia em crescimento contínuo. Os avanços nos sistemas microeletromecânicos e nas tecnologias de comunicação sem fio permitiram a criação de pequenos dispositivos (nós) cada vez mais baratos e menores, equipados com sensores, microprocessador, memória e rádios. Recentemente, a integração destes nós com peças de *hardware* multimídia baratas possibilitou o desenvolvimento de nós capazes de realizar a transmissão de fluxos de vídeo e áudio. A combinação disso com a evolução natural das capacidades de processamento e armazenamento dos nós e das técnicas de processamento de sinais permitiu o surgimento de um novo tipo de rede, denominado Rede de Sensores Sem Fio Multimídia (RSSFM). Estas redes não apenas podem realizar medições de dados escalares, como também, têm capacidade multimídia.

Abstraindo as camadas física e de enlace, que se preocupam e garantem a troca de *bits* e quadros, a comunicação entre os nós da RSSFM como um todo ocorre nas camadas de rede e transporte, se preocupando com o estabelecimento de rotas, priorização de pacotes, controle de congestionamentos e recuperação de erros. O bom funcionamento de tais operações é essencial, pois o tráfego multimídia é pesado por natureza e, assim, o uso da rede deve ser otimizado para garantir que suas transmissões satisfaçam os requisitos da aplicação. Para otimizar o funcionamento de protocolos nestas camadas, diversos aspectos devem ser considerados.

Nosso estudo investigou esses aspectos, mostrando que o tráfego multimídia não só tem menor tolerância à latência pela sua natureza, como também necessita de uma banda maior para a transmissão de seus dados. Para aproveitar melhor a banda, o roteamento multi-caminhos pode ser utilizado, quebrando uma transmissão em diversos subfluxos disjuntos simultâneos. Entretanto, esta abordagem pode agravar ainda mais o surgimento dos buracos dinâmicos, que devem ser contornados. Além disso, as codificações utilizadas podem ter subfluxos ou pacotes de prioridades maiores e, assim, deve existir um esquema de priorização robusto. Finalmente, é essencial o controle rápido e eficiente dos congestionamentos, para evitar que eles cheguem a proporções que levem a mortes de nós ou saturação da banda, e a recuperação dos dados, para garantir um patamar tolerável de qualidade do vídeo transmitido.

Diversas técnicas têm sido empregadas em nível de rede para otimizar as transmissões multimídia. As necessidades tratadas consistem no melhor proveito da banda disponível, na eficiência em energia, e no estabelecimento de rotas com níveis aceitáveis de QoS. O roteamento geográfico se mostra eficiente, ao simplificar a complexidade dos algoritmos

utilizados em abordagens semi-gulosas. Além disso, múltiplos caminhos são amplamente utilizados para otimizar a banda disponível, ao realizar a transmissão simultânea em diversos subfluxos. Tais abordagens podem ser combinadas, e até mesmo utilizadas em conjunto com esquemas de escalonamento de rotas, considerando diferentes prioridades.

Em nível de transporte, as necessidades envolvem o tratamento rápido e eficiente de congestionamentos e a recuperação de dados. A fim de tratar os congestionamentos, os protocolos dessa camada normalmente utilizam técnicas que diminuem a quantidade de dados que trafegam na rede, através da compressão ou mesmo controle de geração de dados. Além disso, para realizar a recuperação dos dados, existem abordagens baseadas em codificações que podem indicar e corrigir erros, e abordagens baseadas em solicitações explícitas para reenvios de dados incorretos.

Combinando essas duas camadas, existem os protocolos *cross-layer*. Tais protocolos normalmente aproveitam a interação existente para otimizar o funcionamento da camada de rede através da camada de transporte, auxiliando na seleção das rotas. Entretanto, as necessidades a serem tratadas deveriam envolver também a priorização diferenciada de pacotes, o controle de congestionamento e a recuperação de dados.

## 4.1 Direções para trabalhos futuros

Baseando-se no estudo realizado e considerando os requisitos apresentados, esta subseção indica as direções para futuras pesquisas na área de RSSFMs com foco na comunicação, isto é, nas camadas de rede, de transporte e em abordagens *cross-layer* destas camadas.

### Camada de rede

Os protocolos de roteamento estudados se utilizaram, em grande maioria, de conhecimento geográfico para operar, e acreditamos que essa é a direção que irá liderar as pesquisas na área de RSSFM. Embora existam críticas sobre a viabilidade do uso de GPS em todos os nós da rede para atingir este fim, a tendência é que estes dispositivos se tornem cada vez mais baratos e, além disso, existem técnicas de localização que não dependem do seu uso em todos os nós da rede, como foi observado na Subseção 2.1.3.

A tendência é que a heterogeneidade das RSSFMs aumente cada vez mais, sendo equipadas de diversos tipos diferentes de nós. Desta forma, uma organização hierárquica da rede pode contribuir para a gerência dos recursos disponíveis. Dos protocolos apresentados, apenas um utilizou uma abordagem hierárquica, não se aprofundando muito em uma elaboração mais sofisticada que vá além do agrupamento de nós e eleição de líderes.

Observamos que o uso de múltiplos caminhos disjuntos para a transmissão de dados pode ter diversos propósitos. Deve-se notar, contudo, que a procura sempre pela menor rota em número de saltos, a fim de minimizar a latência de uma transmissão, pode apre-

sentar resultados indesejáveis. Assim, a distância em saltos não deve ser o único parâmetro para estimar a qualidade de uma rota, e outros parâmetros devem ser considerados em conjunto.

Ademais, o uso de múltiplas rotas com o objetivo de aumentar a confiabilidade na entrega de um dado não deve ser realizado em nível de roteamento, pois a otimização do uso da banda disponível possui maior importância na camada de rede. Assim, consideramos que quebrar um fluxo multimídia em diversos subfluxos e realizar a transmissão dos mesmos por rotas disjuntas é um fator essencial para a otimização da banda disponível.

O suporte robusto à priorização de pacotes é realizado pela minoria dos protocolos de roteamento apresentados, mas essa certamente é uma questão importante. Os fluxos multimídia são muito pesados e existe a necessidade de, em presença de mais de um fluxo, determinar qual o mais importante e como ele deve ser tratado, para evitar desperdício de recursos ao tentar realizar diversas transmissões de diferentes importâncias com o mesmo esforço.

Além disso, a priorização robusta de pacotes completa ou até mesmo substitui o uso de métricas de QoS. Por outro lado, levar em consideração os diferentes tipos de quadro presentes nas codificações de vídeo pode não ser o ideal. A priorização de determinadas partes do fluxo não deve ocorrer na camada de rede. Contudo, esta camada deve prover os mecanismos que possibilitem a priorização dos diferentes tipos de quadros ou subfluxos em camadas superiores.

## **Camada de transporte**

Em nível de transporte, os trabalhos estudados com foco explícito nas RSSFMs tratam ou da confiabilidade de dados ou do controle de congestionamento. Essa divisão é prejudicial às RSSFMs, pois ela depende severamente de ambos os serviços em um mesmo protocolo. A qualidade de vídeo recebido no destino final obviamente depende da taxa de recepção dos dados, necessitando de um mecanismo de recuperação de pacotes perdidos. Além disso, o controle de congestionamento é também uma operação crítica em uma rede de tráfego tão pesado.

Com relação à recuperação de dados, imaginamos que a latência da operação pode ser otimizada através da checagem de erros de maneira salto-a-salto, utilizando abordagens que monitorem o tráfego reenviado pelo nó vizinho. Acreditamos que o uso de codificações complexas para realizar a recuperação de dados introduz latências de processamento indesejáveis para aplicações de tempo real, além de aumentar o consumo de energia nos nós. Entretanto, elas são adequadas para aplicações sem restrições temporais tão severas.

As técnicas de controle de congestionamento tradicionalmente dependem da diminuição da taxa de geração de dados nos nós origens. Todavia, essa abordagem não é adequada às RSSFMs, pois ela introduz uma latência que muitas vezes é intolerável, ou

diminui a qualidade dos dados transmitidos, deteriorando a capacidade de descrição do evento reportado. Além disso, a diminuição da taxa de geração de dados por diminuição de qualidade indesejavelmente depende da camada de aplicação. Ao invés disso, o controle de congestionamento deveria ocorrer através de técnicas alternativas a essa abordagem, como a alteração ou o uso de mais rotas para a transmissão de dados, ou mesmo técnicas que envolvam a compressão dos dados quando em presença de congestionamento.

Finalmente, a camada de transporte também deve prover meios de priorização de pacotes, auxiliando nas operações de recuperação de dados e de controle de congestionamento. Na recuperação de dados, os pacotes mais importantes devem ser recuperados com maior prioridade e, no controle de congestionamento, pacotes mais importantes devem sofrer menor perda na capacidade de descrição de eventos.

## Multicamada

Os protocolos que atuam de maneira *cross-layer* entre as camadas de roteamento e transporte basicamente dependem dos tópicos mencionados individualmente nas subseções anteriores. Trabalhos futuros deveriam não desvirtuar o propósito da camada de transporte, como feito nos trabalhos apresentados, onde os serviços de controle de congestionamento e recuperação de dados foram desconsiderados.

Acreditamos que protocolos *cross-layer* entre as camadas de rede e de transporte possam realizar a gerência das múltiplas rotas disjuntas em abordagens multi-caminhos mais adequadamente, ao integrar o controle do congestionamento nesta tarefa, e considerar os buracos dinâmicos. Além disso, a interação entre as duas camadas permite o uso da técnica de *Network Coding* para aumentar a confiabilidade dos dados, se utilizando da priorização dos pacotes.

Finalmente, ambos os trabalhos com abordagens *cross-layer* entre rede e roteamento que encontramos na literatura se baseiam em protocolos de rede já existentes. Entretanto, os protocolos *cross-layer* deveriam ser criados ou adaptados levando em conta a interação entre as camadas. O uso de protocolos que não consideram esta interação como base elimina as oportunidades de otimização oferecidas, não justificando a perda na organização em camadas na abordagem *cross-layer*.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ozgur B Akan e Ian F Akyildiz. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 13(5):1003 – 1016, 2005.
- [2] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, e Kaushik R Chowdhury. Wireless multimedia sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 14(6):32–39, 2007.
- [3] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, e Kaushik R Chowdhury. Wireless multimedia sensor networks: Applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, 96(10):1588–1605, 2008.
- [4] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, e Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102 – 114, 2002.
- [5] Jamal N Al-Karaki e AHMED E Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6):6 – 28, 2004.
- [6] Islam T Almalkawi, Manel Guerrero Zapata, Jamal N Al-Karaki, e Julian Morillo-Pozo. Wireless multimedia sensor networks: Current trends and future directions. *Sensors*, Janeiro de 2010.
- [7] Michele Battelli e Stefano Basagni. Localization for wireless sensor networks: Protocols and perspectives. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, páginas 1074 – 1077, 2007.
- [8] Luis Cobo, Alejandro Quintero, e Samuel Pierre. Ant-based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple qos metrics. *COMPUTER NETWORKS*, 2010.
- [9] Rita Cucchiara. Multimedia surveillance systems. *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Video surveillance sensor networks*, páginas 3–10, Janeiro de 2005.
- [10] Saeed Darabi, Nasser Yazdani, e Omid Fatemi. Multimedia-aware mmspeed: A routing solution for video transmission in wmsn. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS)*, páginas 1–3, Janeiro de 2009.
- [11] Emad Felemban, Chang-Gun Lee, e Eylem Ekici. Mmspeed: multipath multi-speed protocol for qos guarantee of reliability and. timeliness in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(6):738 – 754, 2006.

- [12] Sally Floyd e Van Jacobson. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, páginas 397–413, Janeiro de 1993.
- [13] P Hurni e Torsten Braun. Energy-efficient multi-path routing in wireless sensor networks. *Ad-hoc*, páginas 72–85, Janeiro de 2008.
- [14] Brad Karp e H T Kung. Gpsr: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, páginas 243–254, 2000.
- [15] Amir Rastegar Lari e Behzad Akbari. Network-adaptive multipath video delivery over wireless multimedia sensor networks based on packet and path priority scheduling. *International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA)*, páginas 351 – 356, 2010.
- [16] Heesang Lee e Kyuhong Lee. Energy minimization for flat routing and hierarchical routing for wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, páginas 735 – 742, 2008.
- [17] Joa-Hyoung Lee e In-Bum Jung. Adaptive-compression based congestion control technique for wireless sensor networks. *Sensors*, páginas 2919–2945, Janeiro de 2010.
- [18] Bruno Marchi, António Grilo, e Mario Nunes. Dtsn: Distributed transport for sensor networks. *Proceedings of the 12th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, páginas 165 – 172, 2007.
- [19] Samir Medjiah, Toufik Ahmed, e Francine Krief. Agem: Adaptive greedy-compass energy-aware multipath routing protocol for wmsns. *Proceedings of the 7th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, páginas 1 – 6, 2010.
- [20] Jose F Mingorance-Puga, Gabriel Macia-Fernandez, António Grilo, e Nestor M C Tiglao. Efficient multimedia transmission in wireless sensor networks. *Proceedings of the 6th EURO-NF Conference on Next Generation Internet*, páginas 1–8, 2010.
- [21] Satyajayant Misra, Martin Reisslein, e Guoliang Xue. A survey of multimedia streaming in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 10(4):18–39, 2009.
- [22] Michele Nati. Geographic routing: Mission possible. *PhD thesis*, Janeiro de 2007.
- [23] Seung-Jong Park, Ramanuja Vedantham, Raghupathy Sivakumar, e Ian F Akyildiz. A scalable approach for reliable downstream data delivery in wireless sensor networks.

- Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, páginas 89, 2004.
- [24] Saad B Qaisar e Hayder Radha. Multipath multi-stream distributed reliable video delivery in wireless sensor networks. *Proceedings of the 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, páginas 207 – 212, 2009.
- [25] Md. Abdur Rahman, Abdulmotaleb El Saddik, e Wail Gueaieb. Wireless sensor network transport layer: State of the art. *Sensors*, páginas 221–245, 2008.
- [26] Samba Sesay, Jie Xiang, Jianhua He, Zongkai Yang, e Wenqing Cheng. Hotspot mitigation with measured node throughput in mobile ad hoc networks. *Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications*, páginas 749–752, 2006.
- [27] Lei Shu, Manfred Hauswirth, Yan Zhang, Jianhua Ma, Geyong Min, e Yu Wang. Cross layer optimization for data gathering in wireless multimedia sensor networks within expected network lifetime. *Journal of Universal Computer Science*, 16(10):1343–1367, 2010.
- [28] Lei Shu, Yan Zhang, Laurence T Yang, Yu Wang, Manfred Hauswirth, e Naixue Xiong. Tpgf: geographic routing in wireless multimedia sensor networks. *Telecommun Syst*, 44(1-2):79–95, Janeiro de 2010.
- [29] Lei Shu, Yan Zhang, Zhiwen Yu, Laurence T Yang, Manfred Hauswirth, e Naixue Xiong. Context-aware cross-layer optimized video streaming in wireless multimedia sensor networks. *J Supercomput*, páginas 1–28, 2010.
- [30] Shio Kumar Singh, M P Singh, e D K Singh. A survey of energy-efficient hierarchical cluster-based routing in wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, páginas 570–580, Janeiro de 2010.
- [31] Stanislava Soro e Wendi B Heinzelman. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering. *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005. Proceedings. 19th IEEE International*, páginas 8, 2005.
- [32] Fred Stann e John Heidemann. Rmst: reliable data transport in sensor networks. *Proceedings of the 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, páginas 102 – 112, 2003.
- [33] Chonggang Wang, Kazem Sohraby, Bo Li, Mahmoud Daneshmand, e Yueming Hu. A survey of transport protocols for wireless sensor networks. *IEEE Network*, 20(3):34–40, 2006.

- [34] Mohammad Hossein Yaghmaee e Donald Adjeroh. A new priority based congestion control protocol for wireless multimedia sensor networks. *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, páginas 1–8, 2008.
- [35] Mohammad Hossein Yaghmaee e Donald Adjeroh. Priority-based rate control for service differentiation and congestion control in wireless multimedia sensor networks. *COMPUTER NETWORKS*, páginas 1798–1811, Janeiro de 2009.
- [36] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, e Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *COMPUTER NETWORKS*, 52(12):2292–2330, 2008.
- [37] YuHua Yuan, HuiMin Chen, e Min Jia;. An optimized ad-hoc on-demand multipath distance vector(aomdv) routing protocol. *Asia-Pacific Conference on Communications*, páginas 569 – 573, 2005.
- [38] Jun Zheng e Abbas Jamalipour. *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. 2009.