

# Uma Arquitetura para Roteamento Dinâmico de Vídeos por Multicaminhos em IoT

D. Oliveira<sup>1</sup>, F. Bhering<sup>2</sup>, K. Obraczka<sup>3</sup>, D. Passos<sup>1,4</sup>, C. Albuquerque<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense (UFF) – Brasil

<sup>2</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) – Brasil

<sup>3</sup>University of California Santa Cruz (UCSC) – USA

<sup>4</sup>Instituto Superior de Engenharia (ISEL) – Portugal

deboraguimaraes@id.uff.br, fabianobhering@cefetmg.br,

katia@soe.ucsc.edu, {dpassos, celio}@ic.uff.br

**Abstract.** *Video applications in the Internet of Things benefit from multipath routing strategies to meet Quality of Service requirements. Although several multipath selection mechanisms have been proposed, changes in topology and/or in video services requirements can impact video quality. This work presents a wireless network architecture that enables dynamic routing, adapting these changes to new path solutions that provide a better Quality of Experience for the users. Simulation results demonstrated that the proposed architecture is capable of recovering video quality in case of degradation due to topology change, as well as also confirming that the presence of control flows, essential for maintaining the topology, reduces the final video quality.*

**Resumo.** *As aplicações de vídeo na Internet das Coisas beneficiam-se de estratégias de roteamento por multicaminhos para suprir os requisitos de Qualidade de Serviço. Apesar de vários mecanismos de seleção de multicaminhos terem sido propostos, as mudanças na topologia e/ou nos requisitos dos serviços de vídeo podem impactar a qualidade do vídeo. Este trabalho apresenta uma arquitetura de rede sem fio que possibilita o roteamento dinâmico, visando adaptar tais mudanças às novas soluções de caminhos que propiciem melhor Qualidade de Experiência ao usuário. Os resultados das simulações demonstraram que a arquitetura proposta é capaz de recuperar a qualidade do vídeo em caso de degradação pela mudança da topologia, bem como também constatam que a presença dos fluxos de controle, imprescindível à manutenção da topologia, reduz a qualidade final dos vídeos.*

## 1. Introdução

Nos últimos anos, os avanços das tecnologias de câmeras IP (*Internet Protocol*) e das redes de comunicação sem fio viabilizaram uma ampla variedade de aplicações de vídeo para Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) em áreas como cidades inteligentes, indústria, meio ambiente e saúde [Bhering et al. 2022c]. Nas cidades inteligentes, mais especificamente no campo da segurança pública, diversas aplicações de vídeo IoT são empregadas na vigilância de vias públicas, de estacionamentos e de transportes públicos

[Myagmar-Ochir and Kim 2023], captando e transmitindo os vídeos por redes sem fio multissaltos.

Face à natureza de alta demanda de tráfego nas transmissões de vídeo, as aplicações IoT podem experimentar congestionamentos e atrasos na rede, em virtude de restrições de banda e perda de pacotes, resultando em impactos adversos na qualidade da mídia entregue [Karaadi et al. 2017]. Neste contexto, os desafios impostos são significativos, devido aos requisitos rigorosos de garantia da QoS (*Quality of Service*) para a rede subjacente em termos de vazão, atraso e perda de pacotes, principalmente no que tange às aplicações de tempo real [Hasan et al. 2017].

O roteamento por multicaminhos, multissalto sem fio, é uma técnica que utiliza múltiplos caminhos entre uma fonte e o seu destinatário. O uso desse tipo de roteamento para a distribuição do tráfego de vídeo tem se apresentado como uma boa estratégia para suprir os requisitos de QoS por oferecer redução de atrasos, devido ao balanceamento de cargas; e redução de perdas contínuas de pacotes [Afzal et al. 2023].

Recentemente, um mecanismo de seleção de multicaminhos para transmissão de vídeos IoT em redes sem fio multissaltos, chamado FITPATH, foi apresentado em [Bhering et al. 2022a]. Naquele trabalho, a performance do FITPATH foi avaliada em comparação a outros seis mecanismos que adotam diferentes métricas e métodos para a seleção de multicaminhos. Dentre estes, o FITPATH e o QSOpt (*QoE-aware suboptimal routing algorithm*) [Quang et al. 2016] se destacaram, respectivamente, com a melhor e a segunda melhor métrica de QoE (*Quality of Experience*) do usuário alcançada.

Embora o FITPATH e o QSOpt sejam baseados na visão corrente da topologia da rede, é importante destacar que nos experimentos dos estudos publicados em [Bhering et al. 2022a] e [Quang et al. 2016], após os caminhos serem selecionados com base na topologia inicial, apenas os fluxos de vídeo foram transmitidos, sem a presença dos fluxos de controle da topologia. Contudo, em um cenário realista, os fluxos de controle devem ser transmitidos juntamente com os fluxos de vídeo, de modo a manter a topologia constantemente atualizada, e permitir que possíveis alterações de rotas sejam automaticamente estabelecidas pelo mecanismo de seleção de multicaminhos, caso ocorram mudanças significativas na topologia ao longo do tempo, como por exemplo, eventuais degradações de qualidade e/ou quebra dos enlaces, ou falha nos nós intermediários.

Motivado por oferecer suporte dinâmico ao roteamento por multicaminhos, este trabalho propõe a implantação de um monitor de topologia em uma arquitetura de rede sem fio, descentralizada, do tipo *ad hoc*. Neste cenário, cada nó mantém a visão completa da topologia da rede, através do monitoramento e a disseminação dos estados dos enlaces, de modo similar ao implementado pelos protocolos de roteamento proativos. O objetivo é permitir que o mecanismo de seleção de multicaminhos estabeleça, de modo automático, novas rotas para os fluxos de vídeo, caso ocorra uma mudança significativa na qualidade de quaisquer enlaces contidos nas rotas preestabelecidas.

Ressalta-se ainda que para manter a topologia constantemente atualizada, é necessário o envio periódico de mensagens de controle. Tais mensagens concorrem com os fluxos de vídeo no canal e podem causar efeitos adversos na QoE do usuário. Visto que o tráfego de controle não foi considerado nos estudos de [Bhering et al. 2022a] e [Quang et al. 2016], este trabalho também tem por objetivo avaliar, sob uma condição de

rede mais realista, o impacto dos fluxos de controle na QoE do usuário, bem como propor soluções de provisionamento que visem mitigar este impacto.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 descreve o cenário de um sistema de videovigilância típico, com transmissões de vídeo por multicaminhos. A Seção 3 faz uma revisão sobre os dois mecanismos de seleção de caminhos, FITPATH e QSOpt, utilizados na arquitetura proposta neste trabalho. Na Seção 4 é proposta a arquitetura da rede, com o detalhamento do monitor de topologia implementado. A metodologia de avaliação e os resultados são apresentados nas Seções 5 e 6. Por fim, a Seção 7 contém as considerações finais, resumizando as contribuições, bem como sugestões para trabalhos futuros.

## 2. Cenário de Aplicação

O cenário de aplicação considerado é de um sistema de videovigilância em área urbana, conforme ilustrado na Figura 1, no qual foi assumido que os nós da rede são fontes de vídeo (câmeras) pertencentes a um conjunto  $S$ , bem como também podem fazer o papel de nós intermediários. Cada fonte  $s \in S$  pode gerar um conjunto de fluxos de vídeo  $f_s = \{f_{s_i}\}$ , onde  $0 < i \leq |f_s|$ . Cada fluxo  $f_{s_i}$  transmitido possui uma taxa de bits específica, determinada pela fonte, de acordo com a resolução do vídeo e o codificador empregado, e utiliza um caminho selecionado  $p_{s_i}$  de uma lista de  $P$  caminhos possíveis para alcançar o destinatário. Em cada nó destinatário, o decodificador de vídeo é responsável por sincronizar e combinar os fluxos recebidos para a renderização do vídeo. Neste cenário, os nós destinatários são estações de vigilância, onde os vídeos são observados por operadores em tempo real e, de acordo com as demandas estabelecidas na aplicação, múltiplas fontes poderão transferir fluxos simultaneamente para um ou mais destinatários.

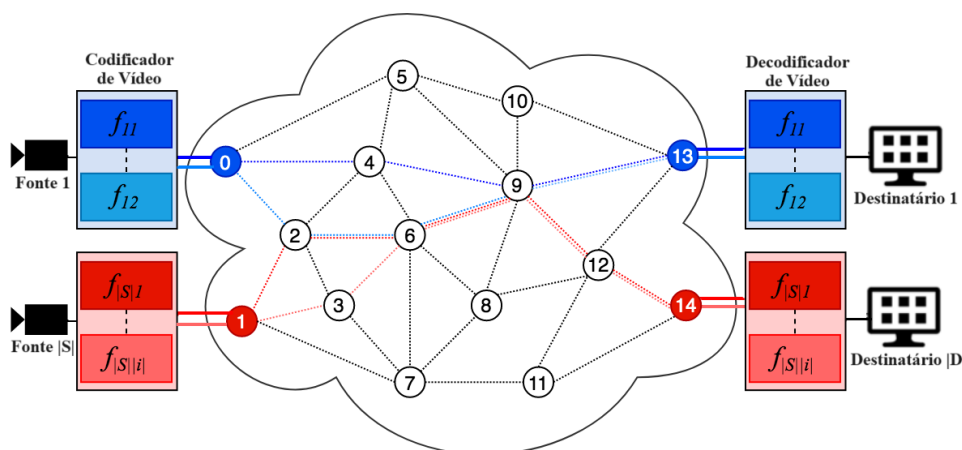


Figura 1. Cenário de um sistema de videovigilância com múltiplas câmeras transmitindo por multicaminhos. Adaptado de [Bhering et al. 2022a].

Em contraste com um codificador de mídia convencional que gera um único fluxo de bits, este trabalho assume o uso de vídeo escalável. O LC (*Layered Coding*) e o MDC (*Multiple Description Coding*) são codificadores escaláveis tradicionalmente utilizados em transmissões de vídeo por multicaminhos [Lee et al. 2003], pois codificam uma fonte em dois ou mais subfluxos com diferentes taxas de bits que podem ser transmitidos pelos

caminhos selecionados. Assim, com o objetivo de maximizar a QoE do usuário, os mecanismos de seleção de multicaminhos devem considerar as taxas de bits de cada fluxo concorrente, a fim de balancear a carga oferecida e minimizar os atrasos e as perdas de pacotes.

### 3. Mecanismos de Seleção de Multicaminhos

O FITPATH e o QSOpt são mecanismos de seleção de multicaminhos que possuem como foco as redes sem fio multissaltos baseadas no padrão IEEE 802.11, e destinam-se aos sistemas IoT que demandem *streaming* de vídeo ao vivo. A seguir será apresentada uma visão geral do princípio de funcionamento de ambos os mecanismos.

#### 3.1. FITPATH

O FITPATH [Bhering et al. 2022a] é um mecanismo baseado na metaheurística ILS (*Iterated Local Search*) [Lourenço et al. 2019] que seleciona caminhos para cada fluxo de vídeo gerado a partir de múltiplas fontes. Os principais componentes do FITPATH são apresentados na Figura 2. O FITPATH requer dois tipos de informações na entrada: (i) a topologia da rede, que consiste nos enlaces disponíveis e seus respectivos custos, computados pela métrica ETX (*Expected Transmission Count*) [De Couto et al. 2003], e (ii) os requisitos dos fluxos de vídeo, compostos pelos identificadores das fontes e seus respectivos destinatários finais, e a taxa alvo de bits do codificador para cada fluxo.

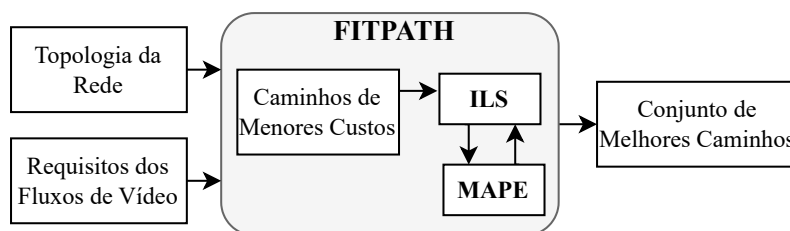


Figura 2. Diagrama geral do FITPATH [Bhering et al. 2022a].

Em linhas gerais, o FITPATH gera, para cada fluxo, um conjunto de caminhos candidatos de menores custos ETX com base no Algoritmo de Yen [Yen 1970]. A seguir, o ILS aplica seu algoritmo de busca iterada e avalia cada solução, dentre os caminhos candidatos, utilizando o MAPE (*Multimedia-Aware Performance Estimator*) [Bhering et al. 2022b], um estimador de desempenho da rede baseado em simulação determinística que fornece, em tempo real, estimativas de vazão, atraso e perda de pacotes considerando a interferência entre os fluxos. Deste modo, o FITPATH toma decisões de roteamento que propiciem maiores vazões aos fluxos de vídeo heterogêneos, ou seja, fluxos com diferentes taxas de bits que são simultaneamente transmitidos.

#### 3.2. QSOpt

O QSOpt [Quang et al. 2016] formula o problema de seleção de múltiplos caminhos usando programação linear inteira mista, e implementa uma heurística para encontrar uma solução que maximize a QoE. Para avaliar a QoE, uma função discreta é proposta para determinar um mapeamento entre a perda de pacotes e a métrica de QoE. Embora o algoritmo centralizado forneça uma solução viável para melhorar a utilização de recursos e a QoE, o modelo do QSOpt não é escalável e requer recursos computacionais significativos

à medida que o número de fluxos aumenta. O QSOpt também assume que todos os fluxos possuem a mesma taxa de bits, independentemente das características de codificação do vídeo, o que restringe a aplicabilidade, impactando na avaliação do nível de interferência entre os fluxos e, conseqüentemente, na capacidade de encontrar as melhores soluções.

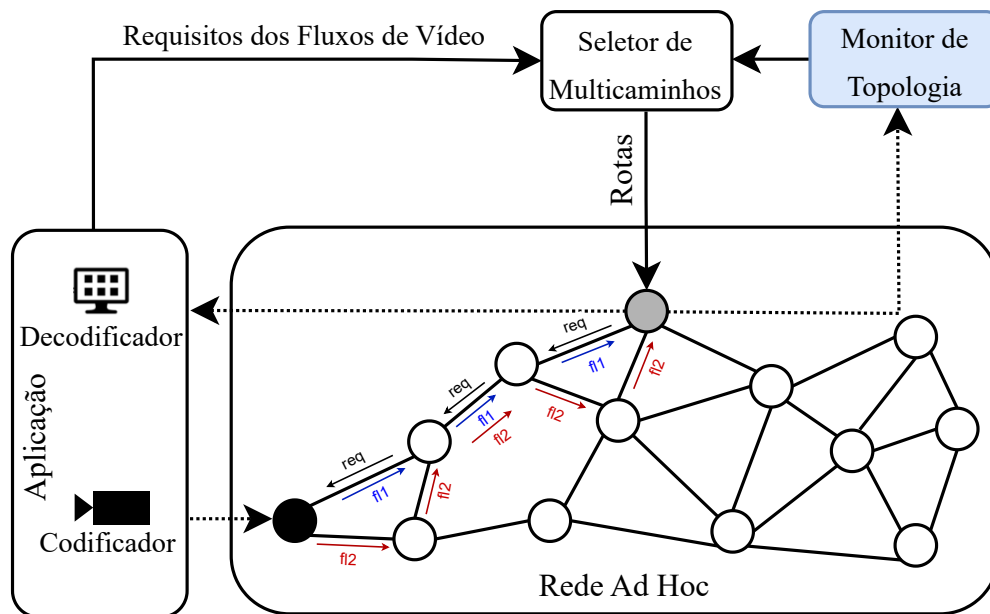
#### 4. Arquitetura Proposta

Nos sistemas IoT de videovigilância aplicados às cidades inteligentes, os nós são tipicamente estacionários e alimentados por fontes de energia contínua. Portanto, não é esperado que ocorram mudanças frequentes na topologia por mobilidade dos nós, nem tão pouco que haja impacto significativo de escassez de energia. No entanto, nas redes em malha sem fio, as transmissões de rádio são suscetíveis a interferências, o que pode levar a mudanças de qualidade e/ou quebra de enlaces. Em situações em que as mudanças da topologia precisam ser consideradas, as informações sobre as condições da rede podem ser obtidas de diferentes formas, dependendo se o plano de controle da rede é centralizado ou descentralizado.

No controle centralizado, uma possível solução consiste do uso de um controlador SDN (*Software Defined Network*) [Xia et al. 2014] que toma as decisões de roteamento assistido por um mecanismo de seleção de caminhos, e baseado nos requisitos de tráfego dos vídeos e na topologia atualizada da rede. O monitor da topologia pode ser instalado no controlador, que recebe as informações diretamente de cada nó. Em seguida, o controlador atualiza as tabelas de roteamento dos nós de encaminhamento para que estes transmitam os fluxos de acordo com os caminhos selecionados.

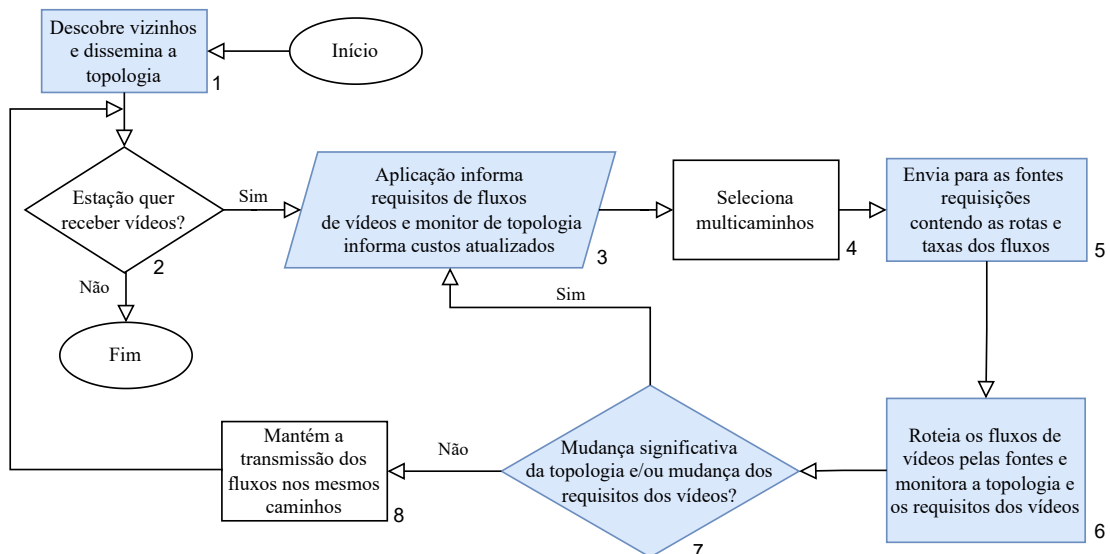
A Figura 3 ilustra a arquitetura proposta de uma rede *ad hoc* sob controle descentralizado, onde o nó destinatário (em cinza) é uma estação de vigilância e o nó fonte (em preto) é a câmera de vídeo. Em cada nó da rede há um módulo de seleção de multicaminhos, um monitor de topologia e a aplicação de vídeo.

A Figura 4 apresenta o fluxograma simplificado de processos para a transmissão de vídeo na arquitetura da Figura 3. No controle descentralizado, objeto desta proposta, (1) todos os nós proativamente fazem transmissões periódicas de mensagens de controle, permitindo que cada nó identifique seus vizinhos e os respectivos custos. Essas informações são disseminadas para garantir que todos os nós tenham a visão global da topologia da rede. (2) No instante em que a estação de vigilância gera uma demanda por vídeos, (3) a aplicação de vídeo e o monitor de topologia da estação de vigilância informam ao seletor de multicaminhos desta, os requisitos dos fluxos de vídeo e a topologia atualizada. (4) O seletor de multicaminhos então seleciona as melhores rotas para os fluxos e, em seguida, (5) a estação de vigilância envia uma mensagem de requisição para cada uma das fontes demandadas, no sentido inverso do melhor caminho selecionado para cada fonte. As taxas requeridas de codificação e as listas completas e ordenadas dos nós através dos quais cada pacote dos fluxos de vídeo deve passar são informadas no cabeçalho da mensagem de requisição. (6) Quando uma requisição chega a uma fonte demandada, o vídeo é codificado conforme as taxas requeridas e os pacotes dos fluxos são transmitidos pelos caminhos selecionados usando a técnica de roteamento pela fonte, incluindo no cabeçalho de cada pacote a informação do caminho completo até o nó destinatário, evitando assim a formação de *loops* de roteamento. (7) Uma vez que o monitoramento da topologia é atualizado periodicamente, poderão ser estabelecidos gatilhos para a busca de novas soluções



**Figura 3. Arquitetura proposta com um plano de controle descentralizado.**

de caminhos, como por exemplo, a falha de um enlace, ou a disponibilidade de novos enlaces na rede. A depender dos serviços de vídeos, os requisitos dos fluxos também poderão ser alterados, como por exemplo, as câmeras poderão ter suas resoluções alteradas, ou serem desabilitadas ou habilitadas. (8) Caso não ocorram mudanças na topologia ou nos requisitos do vídeo, as transmissões serão mantidas pelos caminhos preestabelecidos.



**Figura 4. Fluxograma simplificado de processos para a transmissão de vídeos com roteamento dinâmico por multicaminhos.**

Visto que ambos os seletores de multicaminhos, FITPATH e QSOpt, consideram a interferência entre os fluxos na solução, caso haja demanda de vídeo por mais de uma estação de vigilância, é necessário que os requisitos de vídeo de cada uma das estações de

vigilância sejam considerados pelas demais estações. Para tal, os requisitos de vídeo podem ser disseminados de forma semelhante ao mecanismo de disseminação da topologia apresentado na Seção 4.1.

#### 4.1. Monitor de Topologia

O monitoramento da topologia apresentado neste trabalho é baseado no protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*) [Clausen and Jacquet 2003], sem a aplicação da técnica de MPR (*Multi-Point Relay*), e seu processo é realizado em três estágios: (i) a descoberta dos nós vizinhos alcançáveis por um enlace e o cômputo dos respectivos custos, (ii) a disseminação das informações locais para os demais nós da rede, e (iii) o monitoramento das condições da topologia que possam levar a degradação da qualidade dos enlaces.

A descoberta dos vizinhos alcançados por um enlace é realizada através envio periódico de pacotes HELLO, em *broadcast*, por todos os nós. Quando um nó recebe um pacote HELLO, este identifica o nó de origem e o reconhece como um vizinho. Os custos dos enlaces foram implementados com a métrica ETX. Para isto, cada nó que recebe um pacote HELLO computa a qualidade do enlace LQ (*Link Quality*) como um percentual de mensagens HELLO recebidas de seu vizinho, dentro de uma janela deslizante dos últimos  $p$  pacotes enviados por este vizinho. Para detectar o recebimento ou perda de mensagens HELLO, o nó receptor monitora o número de sequência dos pacotes. Ao transmitir um pacote HELLO, o nó também informa uma lista dos nós vizinhos já descobertos, e seus respectivos LQ. Os nós vizinhos, ao receberem o pacote HELLO, tratam os LQ informados pelo nó de origem como NLQ (*Neighbor Link Quality*).

O ETX [De Couto et al. 2003] é definido como o número de transmissões necessárias para que um quadro seja corretamente recebido pelo seu vizinho. No entanto, além da transmissão dos dados, o sucesso da transmissão na camada de enlace depende também que o quadro de reconhecimento (ou ACK) seja corretamente recebido. Logo, a métrica ETX da transmissão de um nó  $A$  para um nó  $B$  é calculada pelo nó  $B$  como  $ETX_{AB} = 1/(LQ_{AB} \times NLQ_{BA})$ , onde  $LQ_{AB}$  é computado pelo nó  $B$  como o percentual de pacotes HELLO recebidos de  $A$ , dentro do período da janela deslizante, e  $NLQ_{BA}$  é igual ao  $LQ_{BA}$  computado pelo nó  $A$  como o percentual de pacotes HELLO recebidos de  $B$ , dentro do período da janela deslizante, e posteriormente informado ao nó  $B$ , através da mensagem HELLO. Portanto, a grandeza de  $ETX_{AB}$  representa o número provável de tentativas necessárias para que um quadro de dados do nó  $A$  seja recebido corretamente pelo nó  $B$  e o quadro de reconhecimento do nó  $B$  também seja corretamente recebido pelo nó  $A$ . Considerando-se uma rota completa, o número total de transmissões na camada de enlace é estimado como a soma dos valores de ETX de todos os enlaces da rota.

À medida que as informações locais são conhecidas, os nós disseminam sua visão da rede para os demais nós, por meio de pacotes periódicos de controle de topologia TC (*Topology Control*). Quando um pacote TC é recebido por um nó, este armazena as informações em uma estrutura de dados da topologia global, e a mensagem em seguida é retransmitida em *broadcast*. Para evitar sobrecarga na rede e manter a topologia atualizada, é realizado o controle do número de sequência dos pacotes TC. Deste modo, um nó somente armazena e retransmite as informações de um pacote TC, caso o número de sequência do pacote recebido seja maior que o número de sequência anteriormente armazenado.

Caso ocorra uma falha na interface de um nó, o nós vizinhos que eram alcançados por um enlace deixarão de receber os pacotes HELLO do nó falhante, e consequentemente deixarão de atualizar a janela deslizante do LQ na sua topologia local. Por esse motivo foi estabelecido um limite de perdas consecutivas menor que  $n$  pacotes HELLO para a atualização da janela deslizante, e menor que  $m$  pacotes TC para a atualização da topologia global. Caso o período de perdas consecutivas de  $n$  pacotes HELLO seja atingido, os nós vizinhos que eram alcançados por um enlace do nó falhante excluirão, de sua topologia local, a janela deslizante do nó falhante, e no caso de qualquer nó computar  $m$  perdas consecutivas de pacotes TC do nó falhante, esses nós excluirão o nó falhante da sua topologia global. A Tabela 1 apresenta os parâmetros configuráveis do protocolo de monitoramento da topologia, suas descrições e os valores usados nos experimentos aqui apresentados <sup>1</sup>.

**Tabela 1. Parâmetros do Protocolo do Monitor de Topologia.**

Parâmetro	Descrição	Valor
window_size	Janela deslizante com tamanho de $p$ pacotes HELLO	100
hello_interval	Intervalo de transmissão dos pacotes HELLO em segundos	2
tc_interval	Intervalo de transmissão dos pacotes TC em segundos	5
hello_loss_tolerance	Limite de $n$ pacotes HELLO perdidos consecutivamente	20
tc_loss_tolerance	Limite de $m$ pacotes TC perdidos consecutivamente	8
packet_size	Tamanho dos pacotes HELLO e TC em bytes	360

## 5. Metodologia de Avaliação

A arquitetura proposta foi implementada no simulador de redes NS-3 [Riley and Henderson 2010]. Os experimentos foram realizados em um servidor dedicado com processador Intel i7-860 de 2,8 GHz e 32 GB de RAM. O cenário de aplicação modela um sistema de videovigilância implementado em área urbana, onde as fontes de vídeo transmitem os fluxos simultaneamente para uma única estação de vigilância.

Em cada simulação, 59 nós foram alocados aleatoriamente em uma região de 300 m  $\times$  300 m, separados uns dos outros por uma distância mínima de 5 m, e com um alcance de transmissão de 100 m. Em complemento, um nó destinatário foi fixado em um vértice da área, na coordenada em metros (300, 300), totalizando 60 nós. As fontes geradoras dos vídeos foram posicionadas dentre as dez seguintes coordenadas em metros: (0, 0), (0, 50), (0, 100), (0, 150), (0, 200), (50, 0), (100, 0), (150, 0), (200, 0) e (50, 50). Na camada MAC (*Medium Access Control*) foi adotado o padrão IEEE 802.11g com taxa de transmissão fixa de 18 Mb/s para todos os enlaces. Na camada física foi utilizado o

<sup>1</sup>Ressalta-se que estes são valores típicos usados por protocolos proativos como o OLSR [Clausen and Jacquet 2003] e adequados para as topologias utilizadas neste trabalho.



modelo de propagação Cost231 [Stoffers and Riley 2012] em 2,4 GHz, que reproduz as condições de um ambiente urbano. Estes parâmetros são iguais aos adotados no trabalho de [Bhering et al. 2022a] para o FITPATH e o QSOpt.

O framework Evalvid [Dawood et al. 2021] foi utilizado para gerar tráfego de vídeo realista para as simulações. Ele gera o tráfego correspondente a um determinado videoclipe, e dispõe de ferramentas para decodificar e mensurar a qualidade do vídeo entregue ao receptor. Os experimentos empregaram vídeos comumente utilizados, e disponíveis publicamente, conhecidos como “*Hall Monitor*”, “*Bus*” e “*Coastguard*” [Seeling and Reisslein 2011], que representam cenas de diferentes níveis de complexidade de movimento, ou seja, baixo, médio e alto nível de movimento, respectivamente. Os vídeos foram convertidos para o formato H.264 com taxa de 30 quadros por segundo.

Os tráfegos de vídeo foram gerados usando uma combinação de cinco diferentes taxas alvo de codificação de vídeo: 256 kb/s, 512 kb/s, 1 Mb/s, 1,5 Mb/s e 2 Mb/s, para representar diferentes níveis de resolução de vídeo. Na fonte de vídeo, os fluxos foram encaminhados de acordo com as estratégias especificadas por cada uma das propostas avaliadas utilizando técnicas de codificação de vídeo LC ou MDC. Nas propostas avaliadas também foi definido um *playout buffer* de  $t$  ms para mitigar potenciais pacotes fora de ordem; pacotes com atraso superior a  $t$  ms foram descartados no decodificador. O instante de 400 segundos, a partir do início da simulação, foi estabelecido para a inicialização do mecanismo de seleção de caminhos com a topologia computada até este momento. Os valores estabelecidos para os parâmetros do protocolo do monitor de topologia estão relacionados na Tabela 1. Os parâmetros de rede e da aplicação utilizados nas simulações estão relacionados na Tabela 2.

A qualidade do vídeo recebido foi avaliada através do índice de similaridade estrutural SSIM (*Structural Similarity Index Measure*) [Wang et al. 2004], que é uma métrica objetiva amplamente utilizada para mensurar a QoE do usuário [Orosz et al. 2014]. O SSIM mede a distorção estrutural do vídeo. Para isso, combina luminância, contraste e semelhança estrutural dos quadros para comparar cada quadro original com o correspondente entregue (possivelmente distorcido). Os valores do SSIM variam entre 0 e 1, onde 1 significa a qualidade máxima.

**Tabela 2. Parâmetros das Simulações.**

Rede		Aplicação	
Área	300 × 300 m	Tipo de tráfego	VBR ( <i>Variable Bit Rate</i> )
Topologia da rede	Aleatória	Taxa de quadros	30 fps ( <i>frames/s</i> )
No. de nós	60	Nível de mov. da cena	Baixa, média e alta
Dist. mín. entre nós	5 m	<i>Payload</i>	1024 B
Alcance de Tx dos nós	100 m	Taxa de codificação	256 kb/s, 512 kb/s, 1 Mb/s, 1.5 Mb/s e 2 Mb/s
Camada de transporte	UDP	Nº de nós coletores	1
Camada MAC/PHY	802.11g	Nº de nós fontes	até 4
Banda de frequência	2.4 GHz	Nº de fluxos	até 8 (2 por fonte)
Taxa de dados	18 Mb/s	Carga oferecida	1 Mb/s, 2 Mb/s, 4 Mb/s, 6 Mb/s e 8 Mb/s
Modelo de Propagação	Cost231		

## 6. Resultados Experimentais

Esta seção apresenta os resultados dos dois experimentos realizados com o objetivo de: (i) avaliar o impacto das mensagens de controle na qualidade dos vídeos recebidos, e (ii) analisar a evolução da qualidade dos vídeos recebidos, através de um exemplo, no contexto de otimização da solução de multicaminhos e na mudança da topologia em caso de falha de enlace.

### 6.1. Impacto das Mensagens de Controle na QoE

Neste experimento, as transmissões de vídeo foram realizadas por quatro fontes, simultaneamente, com cargas ofertadas de 1, 2, 4, 6 e 8 Mb/s. Cada carga consiste na soma das taxas de bits alvo de todos os fluxos de vídeos transmitidos.

Para cada carga ofertada, foram simuladas 30 instâncias de topologia em duas condições: (i) realista - com as mensagens de controle sendo transmitidas simultaneamente com os fluxos de vídeos, e (ii) não-realista - com a interrupção das transmissões das mensagens de controle após o cômputo da topologia e início da transmissão dos vídeos <sup>2</sup>.

A Figura 5(a) apresenta os resultados da QoE nas duas condições de transmissão das mensagens de controle, durante o tráfego de 300 quadros do videoclipe “*Hall Monitor*” (cenas de baixa mobilidade) a partir de cada fonte, com codificação LC e *playout buffer* de 480 ms nas soluções: (i) do FITPATH; e (ii) do QSOpt. O resultado da QoE foi computado para cada carga ofertada como o valor médio de SSIM com um intervalo de confiança de 95%. Quando as transmissões dos vídeos foram realizadas em concorrência com as mensagens de controle, a média de QoE dos vídeos recebidos pelas soluções do FITPATH e do QSOpt sofreram, respectivamente, uma redução de 2,90% e 2,19% em comparação com a média de QoE dos vídeos recebidos sem a concorrência das mensagens de controle.

Na Figura 5(b) foram realizadas simulações similares, porém com cenas de alta mobilidade do videoclipe “*Coastguard*”, em codificação MDC e cargas ofertadas de 1, 2 e 3 Mb/s. Quando as transmissões dos vídeos foram realizadas em concorrência com as mensagens de controle, a média de QoE dos vídeos recebidos pelas soluções do FITPATH e do QSOpt atingiram, respectivamente, uma redução de 11,87% e 13,71% em comparação com os vídeo recebidos sem a concorrência das mensagens de controle.

Nota-se que a qualidade do vídeo recebido diminui não somente com o aumento da carga ofertada e da mobilidade das cenas no vídeo, mas também com a concorrência das mensagens de controle junto aos fluxos de vídeo, independentemente do mecanismo de seleção de caminhos utilizado (FITPATH ou QSOpt), especialmente para vídeos com cenas de maiores níveis de mobilidade, uma vez que as rajadas geradas pelas mudanças de cenas resultam em maiores contenções e, conseqüentemente, mais colisões e atrasos nas filas.

Uma possível estratégia para mitigar as perdas de QoE causadas pelos fluxos de controle seria a provisão das taxas destes fluxos, juntamente com as taxas dos fluxos de vídeo, para os mecanismos de seleção de multicaminhos, de modo que todos os fluxos possam ser considerados no processo de escolha das rotas que propiciem maiores vazões e menores perdas.

---

<sup>2</sup>A condição não-realista foi utilizada nos experimentos de [Bhering et al. 2022a] e [Quang et al. 2016].

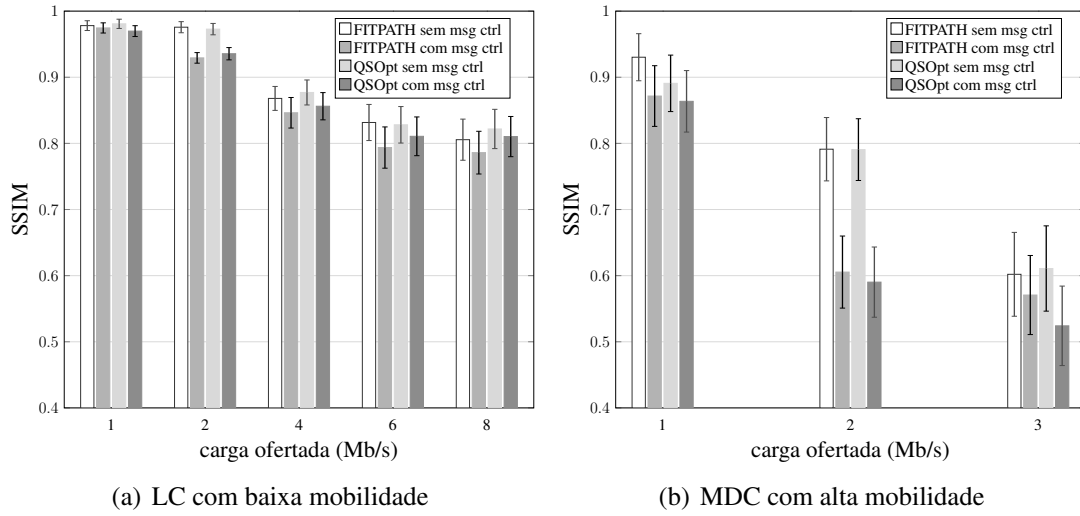


Figura 5. Impacto das mensagens de controle na QoE do usuário.

## 6.2. Performance da QoE e Evolução do ETX no Roteamento Dinâmico

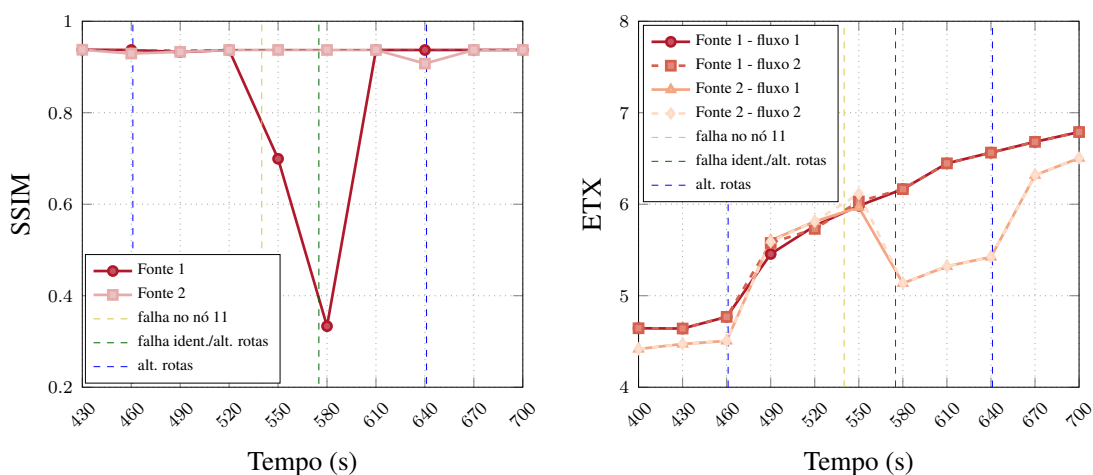
As transmissões de vídeo foram realizadas simultaneamente por duas fontes codificadas em 512 kb/s e alocadas nas coordenadas (0, 50) e (50, 0). Foram transmitidos, a partir de cada fonte, 9000 quadros do videoclipe “Bus”, com codificação LC e *playout buffer* de 1000 ms. A topologia foi computada até o instante de 400 segundos e, em seguida, a transmissão foi realizada através da solução inicial de caminhos gerada pelo FITPATH. Após o tempo limite de execução da heurística de 60 segundos, a solução final é gerada e, a partir do instante de 460 segundos, o tráfego dos fluxos de vídeo foram roteados pela nova solução. Os caminhos gerados pelo FITPATH, para a topologia de 60 nós, são apresentados na Figura 6. Observa-se que diferentemente da solução final que considera a interferência entre os fluxos, a solução inicial não considera a interferência entre os fluxos e sempre gera o mesmo caminho (caminho de menor ETX) para todos os fluxos transmitidos pela mesma fonte.



Figura 6. Soluções de caminhos geradas pelo FITPATH na topologia de 60 nós.

A Figura 7(a) ilustra a média da QoE, mensurada em SSIM, dos quadros de vídeo transmitidos nos últimos 30 segundos. No instante de 460 segundos a QoE média do vídeo transmitido pela fonte 2, através da solução inicial, foi de 0,93, enquanto a QoE média do vídeo transmitido pela fonte 2, através da solução final, nos instantes de 490 e 520 segundos foi de 0,94, e portanto 1% maior que na solução anterior. A respeito da QoE média dos vídeos transmitidos pela fonte 1, esta permaneceu em 0,94 para ambas as soluções (inicial e final). No instante de 540 segundos ocorre a falha do nó 11, pro-

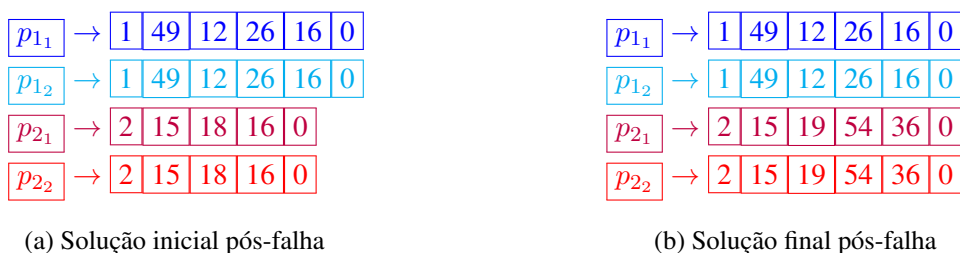
vocando então uma redução abrupta da QoE do vídeo transmitido pela fonte 1. A falha foi identificada pela estação de vigilância no instante de 575 segundos, pois o limite de tempo para a atualização das informações da topologia, por meio das mensagens de TC, foi atingido. Com a mudança da topologia, o mecanismo de seleção de caminhos inicializa a busca de novas soluções e imediatamente reestabelece o roteamento através de uma nova solução inicial. A Figura 8 ilustra as novas soluções após a mudança da topologia em decorrência da falha do nó 11. Nota-se que na solução inicial pós-falha, todos os caminhos gerados utilizam o enlace 16 → 0. No entanto, na solução final pós-falha, os fluxos de vídeo da fonte 2 tornam-se totalmente disjuntos dos fluxos da fonte 1, uma vez que foram consideradas as interferências entre os fluxos na otimização das rotas.



(a) QoE média dos últimos 30 segundos.

(b) Métrica de roteamento no nó destinatário.

**Figura 7. Performance da QoE e evolução da métrica de roteamento.**



(a) Solução inicial pós-falha

(b) Solução final pós-falha

**Figura 8. Soluções de caminhos geradas pelo FITPATH após falha do nó 11.**

Na Figura 7(a) verifica-se que a QoE média do vídeo transmitido pela fonte 2 por meio da solução inicial pós-falha, no instante de 640 segundos, foi de 0,91, enquanto a QoE média do vídeo transmitido pela fonte 2, através da solução final pós-falha, nos instantes de 670 e 700 segundos foi de 0,94, e portanto 3% maior que na solução anterior. A respeito da QoE média do vídeo transmitido pela fonte 1, esta permaneceu em 0,94 para ambas as soluções após a falha (inicial e final).

A evolução da métrica de roteamento ETX ao longo do tempo é apresentada na Figura 7(b). É possível observar que apesar das curvas dos fluxos da fonte 2 apresentarem aumento de seus coeficientes com as alterações das rotas da solução inicial para a solução final (tanto antes, quanto depois da falha), a tendência de aumento do ETX não se refletiu

em degradação da QoE dos vídeos recebidos. Ao contrário, a QoE melhorou com as transmissões realizadas pelas soluções de caminhos otimizadas pelo FITPATH. Em que pese a falha do nó 11 ter impactado negativamente a QoE do vídeo transmitido pela fonte 1 entre o instante em que a falha se manifesta e a percepção da falha na estação de vigilância, também é possível observar que após o reestabelecimento de novos caminhos, o aumento do ETX das novas rotas não causou prejuízos à QoE do vídeo recebido.

Este experimento foi apresentado de uma forma didática, contudo outras situações de falhas foram simuladas, gerando comportamentos semelhantes ao experimento apresentado, o que demonstra a habilidade da arquitetura de se adaptar às falhas e restaurar a QoE do usuário.

## 7. Conclusões

Neste artigo, é apresentada uma arquitetura de rede sem fio descentralizada que viabiliza a execução de testes dos mecanismos de seleção de multicaminhos para vídeos IoT em cenários mais realistas, que requeiram a visão global da topologia. Essa arquitetura é capaz de oferecer suporte dinâmico ao roteamento diante de mudanças significativas na topologia, variações nos requisitos dos vídeos, e otimização das rotas pelo mecanismo de seleção de caminhos. Vislumbra-se como trabalho futuro a proposta de uma arquitetura com o controle centralizado, além da execução de testes exaustivos dos mecanismos de controle FITPATH e QSOpt em cenários de roteamento dinâmico, tais como em condições de falha de nós; inclusão de novos nós na rede; e em serviços que demandem a alteração da resolução do vídeo ou do status de habilitação das câmeras.

Neste trabalho também foi observado que os fluxos de controle causam efeitos adversos na QoE do usuário. Assim, estudos futuros poderão avaliar estratégias de provisionamento das taxas dos fluxos de controle aos mecanismos de seleção de multicaminhos, a fim de mitigar tais efeitos.

## Referências

- Afzal, S., Testoni, V., Rothenberg, C. E., Kolan, P., and Bouazizi, I. (2023). A holistic survey of multipath wireless video streaming. *Journal of Network and Computer Applications*, 212:103581.
- Bhering, F., Passos, D., Albuquerque, C., and Obraczka, K. (2022a). Efficient multipath selection for iot video transmission. In *2022 IEEE 11th International Conference on Cloud Networking (CloudNet)*, pages 73–78. IEEE.
- Bhering, F., Passos, D., Obraczka, K., and Albuquerque, C. (2022b). Network performance estimator with applications to route selection for iot multimedia applications. *SIMULATION*, page 00375497231156618.
- Bhering, F., Passos, D., Ochi, L. S., Obraczka, K., and Albuquerque, C. (2022c). Wireless multipath video transmission: when iot video applications meet networking—a survey. *Multimedia Systems*, 28(3):831–850.
- Clausen, T. and Jacquet, P. (2003). Optimized link state routing protocol (olsr). Technical report.

- Dawood, M. S., Benazer, S. S., Karthick, R., Ganesh, R. S., and Mary, S. S. (2021). Performance analysis of efficient video transmission using evalsvc, evalvid-nt, evalvid. *Materials Today: Proceedings*, 46:3848–3850.
- De Couto, D. S., Aguayo, D., Bicket, J., and Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 134–146.
- Hasan, M. Z., Al-Rizzo, H., and Al-Turjman, F. (2017). A survey on multipath routing protocols for qos assurances in real-time wireless multimedia sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3):1424–1456.
- Karaadi, A., Sun, L., and Mkwawa, I.-H. (2017). Multimedia communications in internet of things qot or qoe? In *2017 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pages 23–29. IEEE.
- Lee, Y.-C., Kim, J., Altunbasak, Y., and Mersereau, R. M. (2003). Performance comparisons of layered and multiple description coded video streaming over error-prone networks. In *IEEE International Conference on Communications, 2003. ICC'03.*, volume 1, pages 35–39. IEEE.
- Lourenço, H. R., Martin, O. C., and Stützle, T. (2019). Iterated local search: Framework and applications. *Handbook of metaheuristics*, pages 129–168.
- Myagmar-Ochir, Y. and Kim, W. (2023). A survey of video surveillance systems in smart city. *Electronics*, 12(17):3567.
- Orosz, P., Skopkó, T., Nagy, Z., Varga, P., and Gyimóthi, L. (2014). A case study on correlating video qos and qoe. In *2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, pages 1–5. IEEE.
- Quang, P. T. A., Piamrat, K., Singh, K. D., and Viho, C. (2016). Video streaming over ad hoc networks: A qoe-based optimal routing solution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2):1533–1546.
- Riley, G. F. and Henderson, T. R. (2010). The ns-3 network simulator. In *Modeling and tools for network simulation*, pages 15–34. Springer.
- Seeling, P. and Reisslein, M. (2011). Video transport evaluation with h. 264 video traces. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4):1142–1165.
- Stoffers, M. and Riley, G. (2012). Comparing the ns-3 propagation models. In *2012 IEEE 20th international symposium on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunication systems*, pages 61–67. IEEE.
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., and Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE transactions on image processing*, 13(4):600–612.
- Xia, W., Wen, Y., Foh, C. H., Niyato, D., and Xie, H. (2014). A survey on software-defined networking. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1):27–51.
- Yen, J. Y. (1970). An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. *Quarterly of applied mathematics*, 27(4):526–530.