

Soluções Cross-Layer para Redes de Telecomunicações - Uma Visão Geral

Lucas Dias Palhão Mendes, Josias Teixeira Guimarães e José Marcos Câmara Brito
Instituto Nacional de Telecomunicações

Resumo – Nas atuais redes de telecomunicações sem fio é necessário utilizar conceitos de projetos cross-layer para melhorar o desempenho das redes. Este tutorial tem por objetivo classificar e organizar as mais recentes propostas de soluções cross-layer para redes de telecomunicações, além de destacar questões ainda abertas e que precisam ser pesquisadas.

Abstract – In current wireless telecommunications networks is necessary to use cross-layer design to improve the network performance. This tutorial aims to classify and organize the latest proposals for cross-layer solutions in telecommunications networks and highlight some open issues in this research area.

I. Introdução

A quase totalidade das redes de telecomunicações é organizada em uma arquitetura em camadas. Neste tipo de arquitetura cada camada é responsável por executar um conjunto de funções, não importando a forma como as funções são executadas, desde que requisitos de desempenho pré-definidos sejam satisfeitos. Uma camada inferior presta serviço para a camada superior imediatamente adjacente e só há comunicação entre camadas vizinhas, por meio de interfaces entre as camadas.

A Figura 1 ilustra, a título de exemplo, uma arquitetura composta de três camadas. Os protocolos em cada camada na máquina de origem se comunicam com sua camada correspondente no destino, como mostrado pelas setas pontilhadas na Figura 1, porém não há transmissão direta entre as camadas em diferentes máquinas. Uma camada que tenha algo para transmitir passa seus dados para a camada inferior a ela até que se alcance o *meio físico*, muitas vezes um meio sem fio, por onde trafegarão os *bits* de informação. No destino, esses *bits* serão transportados para cima pelas camadas até chegar à camada de destino, que corresponde àquela que gerou os dados na origem. Para trafegarem entre as camadas, os dados passam pelas *interfaces*, indicadas pelas linhas cheias na Figura 1.

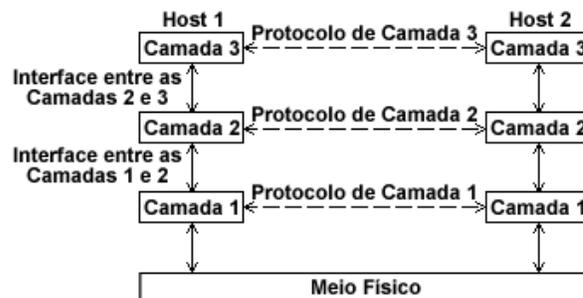


Figura 1: Modelo ilustrativo em 3 camadas

Um exemplo clássico, teórico, de arquitetura em camadas é o modelo OSI (*Open System Interconnection*), definido pela ISO (*International Standards Organization*) com o objetivo de estabelecer a base para a criação de protocolos padrões, nas diversas camadas, para a implementação de redes de computadores. O modelo OSI estabelece uma rede composta de sete camadas ou níveis: físico, enlace, rede, transporte, sessão, apresentação e aplicação. [1]

Outro importante exemplo de arquitetura em camadas, talvez a mais importante arquitetura atualmente presente nas redes de telecomunicações, é a Arquitetura TCP/IP. Esta arquitetura é composta de quatro camadas: *host-to-network*, *Internet*, transporte e aplicação. [2]

Neste artigo adotaremos, seguindo [2], um modelo híbrido composto de cinco camadas, denominadas: física, enlace, rede, transporte e aplicação. Este modelo é ilustrado na Figura 2.

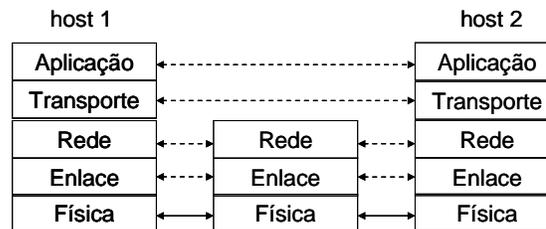


Figura 2: Modelo híbrido de cinco camadas utilizado neste artigo.

As principais funções de cada uma das camadas, no contexto que interessa ao tema do artigo, são:

- Física: responsável pela transmissão do sinal, implementando para isto as funções de modulação digital, definição da potência de transmissão, taxa de transmissão e detecção da taxa de erro de bit no canal.

- Enlace: responsável pela função de controle de erro, quer seja com correção automática no receptor (FEC - *Forward Error Correction*), com correção por retransmissão (ARQ - *Automatic Repeat reQuest*) ou com um híbrido de ambos, pela definição do tamanho dos quadros e pela função de múltiplo acesso ao meio de comunicação.
- Rede: responsável pela função de roteamento, que decide o melhor caminho até o destino dos pacotes, pela definição da interface de rede a ser usada (apenas em dispositivos com mais de uma interface, como por exemplo um PDA – *Personal Digital Assistant* - que possua uma interface de rede local sem fio e outra de sistema de comunicação móvel) e por funções de controle de congestionamento.
- Transporte: esta é a primeira camada fim-a-fim da rede, como ilustra a Figura 2, ou seja, a primeira camada em que o protocolo do *host* de origem se comunica diretamente (via as camadas inferiores) com o protocolo do *host* de destino. Esta camada gerencia as comunicações fim-a-fim e também executa, em alguns casos, a função de controle de erro fim-a-fim.
- Aplicação: gera os dados que trafegarão na rede, os quais podem ter requisitos de qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) a serem seguidos para que a aplicação em uso opere de forma satisfatória para o usuário.

As vantagens das arquiteturas em camadas são a grande flexibilidade e facilidade de alterar a operação de uma camada sem influenciar o comportamento das demais, uma vez que basta a camada executar as funções que lhe são afeitas, não importando a forma como esta execução ocorre. Estas vantagens foram determinantes no processo evolutivo das redes de telecomunicações nos últimos 40 anos.

No entanto, as arquiteturas em camadas também oferecem algumas desvantagens importantes, como o grande *overhead* existente (proporcional ao número de camadas), a duplicidade de implementação de funções e a impossibilidade de ajuste de parâmetros de uma camada com base no comportamento de outras camadas não adjacentes.

Exemplos de duplicidade de funções são o controle de erro – executado na camada de enlace, na camada de transporte e às vezes na camada de aplicação – e a criptografia, executada na camada de aplicação e, muitas vezes, também na camada de enlace, para redes sem fio, como nas redes IEEE 802.11 (*WiFi*).

Por outro lado, a impossibilidade de comunicação entre camadas não adjacentes pode resultar em baixo desempenho das redes, particularmente em redes sem fio. Por exemplo, em [3] os autores demonstraram que a maximização da vazão de uma rede TCP/IP demanda o ajuste do tamanho do segmento na camada de transporte em função da taxa de erro de bit no canal e do protocolo de retransmissão utilizado na camada de enlace.

Por fim, o conceito de redes e rádios cognitivos, introduzido por Mitola em [4], demanda a necessidade de ajuste, para maximização do desempenho do sistema, da forma de implementação das funções das diversas camadas, umas em funções das outras, fazendo com que as arquiteturas em camadas passem a ser um obstáculo para a otimização do desempenho das redes.

Com o objetivo de contornar as dificuldades acima apresentadas, dentre outras, surgiram propostas de soluções que não consideravam os paradigmas impostos pelas arquiteturas em camadas, o que se chamou de projeto *cross-layer*.

Os esforços foram iniciados com embasamentos diferentes, em centros de pesquisa diferentes, o que acabou gerando um grande número de propostas que tinham por objetivo otimizar diferentes parâmetros em redes de vários tipos, sempre incluindo enlaces sem fio.

Esta multiplicidade de propostas levou à necessidade de se analisar cada uma delas e verificar se poderiam interoperar ou se a adoção de duas ou mais delas acabariam por piorar o desempenho das redes.

Este artigo tem por objetivo apresentar um resumo das principais propostas *cross-layer* presentes na literatura, segundo a classificação definida por Srivastava e Motani em [5].

Uma visão geral das propostas já apresentadas pode facilitar a solução de uma importante questão ainda aberta, a criação de uma interface padrão para troca de parâmetros entre as camadas, de modo a viabilizar a implementação de soluções que resultem na otimização do desempenho das redes de telecomunicações, particularmente aquelas em que há a presença de enlaces sem fio, naturalmente sujeitos a taxas de erro de bit mais elevadas e que apresentam grande variação de comportamento com o tempo.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II mostra a definição de soluções *cross-layer*, a motivação para usar projetos desse tipo, suas classificações e propostas de implementação e, ainda, algumas precauções a serem tomadas nos projetos e aspectos não abordados pela literatura atual; na seção III são enumerados os tipos de redes mais utilizados em projetos *cross-layer*; a seção IV traz conceitos menos comuns de *cross-layer* que

aparecem na literatura; finalmente, as conclusões são apresentadas na seção V.

II. Soluções *Cross-Layer*

II.1. Definição

Segundo Srivastava e Motani, em [5], uma arquitetura em camadas divide as tarefas de uma rede em módulos e define uma hierarquia de serviços providos por cada uma das partes, os quais são concretizados através do projeto de protocolos. A arquitetura proíbe comunicação direta entre duas camadas não-adjacentes e a comunicação permitida se dá por chamadas a procedimentos e respostas.

No *framework* de uma arquitetura de referência em camadas, o projetista tem duas opções para desenvolver um protocolo:

1. Projeto respeitando as regras da arquitetura de referência;
2. Projeto violando a arquitetura de referência, por exemplo, permitindo uma comunicação direta entre protocolos de camadas não-adjacentes, permitindo que protocolos tenham acesso a informações que não são compartilhadas nem mesmo com camadas adjacentes, ou compartilhando variáveis globalmente, ou seja, entre todas as camadas. Uma violação de uma arquitetura em camadas é um **projeto *cross-layer***.

Violações, tais como as introduzidas por projetos *cross-layer*, claramente reduzem o significado da arquitetura, uma vez que ela já não representa o sistema atual. Se muitas violações se acumulam através do tempo, a arquitetura original pode perder completamente seu significado.

II.2. Motivação para um projeto *cross-layer*

As violações de arquitetura se fizeram necessárias devido à presença de enlaces sem fio, basicamente por três razões, discutidas nos parágrafos após a enumeração:

1. Problemas presentes apenas em ambientes sem fio;
2. Possibilidade de comunicação oportunista;
3. Novas modalidades de comunicação oferecidas pelo meio.

Sob uma visão pessimista, os enlaces sem fio criam vários novos problemas para o projeto de protocolos que não podem ser bem tratados no

framework de arquiteturas em camadas. Existe um caso clássico em que um transmissor TCP interpreta um erro em um enlace sem fio como sendo um indicador de congestionamento, reduzindo a vazão da conexão TCP desnecessariamente.

Sob uma visão otimista, redes sem fio oferecem caminhos para comunicação oportunista que não podem ser explorados em um modelo em camadas. Por exemplo, pode-se utilizar a natureza *broadcast* do meio sem fio para enviar dados a vários usuários ao mesmo tempo, o que requereria um *hub* no meio cabeado, ou ainda, receber vários fluxos de dados na camada física permitindo a transmissão/recepção por diferentes canais. Para que tais vantagens possam ser aproveitadas, as arquiteturas em camadas devem ser violadas.

II.3. Classificações das soluções *cross-layer*

Existem muitas propostas de *projetos cross-layer* na literatura. As formas de interação entre as camadas, ou seja, os tipos de violação de arquitetura mais encontrados são os seguintes:

1. Criação de novas interfaces;
2. Fusão de camadas adjacentes;
3. Acoplamentos de projeto sem novas interfaces;
4. Calibração vertical através das camadas.

Os exemplos mostrados a seguir, juntamente com a explicação de cada classificação, são apenas de caráter ilustrativo e não serão abordados em detalhes posteriormente. As violações de arquitetura identificadas podem ser combinadas para formar projetos *cross-layer* mais complexos.

II.3.1. Criação de Novas Interfaces

Vários projetos *cross-layer* requerem a criação de novas interfaces entre as camadas, as quais poderão ser usadas para compartilhamento de informações entre as camadas de forma dinâmica, ou seja, durante a operação da rede. Nesse caso, a violação de arquitetura é a criação de uma interface não existente na arquitetura em camadas. Pode-se dividir essa classificação em três subcategorias dependendo da direção do fluxo de informação através das novas interfaces:

- *Upward*: De uma camada inferior para uma superior;
- *Downward*: De uma camada superior para uma inferior;
- *Back and Forth*: Fluxo em ambas direções entre duas camadas.

Fluxo de Informação *Upward* – O protocolo de uma camada superior que requer dinamicamente alguma informação de uma inferior resulta na criação de uma nova interface de uma camada inferior para outra superior, como mostrado na Figura 3.

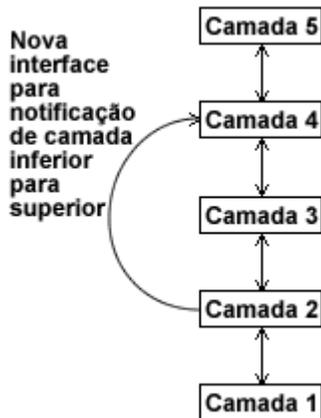


Figura 3: Interface Upward

Por exemplo, na referência [6] os autores apresentam um algoritmo de controle de taxa de vídeo (VCRA - *Video Rate Control Algorithm*), na camada de aplicação, que varia a geração de dados a serem transmitidos de acordo com um controle híbrido automático de taxa. Esse controle é responsável por medir a SSIA (*Signal Strength Indication of Acknowledged frames*), parâmetro obtido conjuntamente pela camada de enlace e pela física, da seguinte forma: a primeira informa se o quadro recebido é um reconhecimento para a camada física, enquanto essa mede a potência somente desse tipo de quadro; o SSIA medido determina a taxa de dados que deve ser usada pela camada de enlace na transmissão e, com base nessa taxa, o VCRA da camada de aplicação atua aumentando a taxa de geração de dados (quantizando o vídeo com maior resolução, ou seja, mais *bits* por amostra de vídeo) quando o canal está bom, e a diminuindo caso contrário.

Outro exemplo de proposta *cross-layer* que demanda fluxo de informação *upward* é apresentado em [3], onde o tamanho do segmento TCP é ajustado, visando a maximização da vazão para a camada de aplicação, de acordo com a taxa de erro de bit e o protocolo de retransmissão utilizado, informações oriundas, respectivamente, da camada física e da camada de enlace.

Exemplos de fluxos de informação *upward* também são vistos na literatura na camada de enlace na forma de modulações adaptativas ao estado do canal [7]. A idéia contida nessas propostas é adaptar os parâmetros da modulação (e.g. potência, modulação, taxa de codificação) de acordo com a condição do canal, que é informada à camada de enlace através de

uma interface vinda da camada física. Nota-se que mesmo se tratando de camadas adjacentes, o exemplo citado requer uma interface inexistente na arquitetura em camadas.

Por fim, em [8] os autores citam o uso de uma mensagem de notificação explícita de congestionamento (ECN - *explicit congestion notification*) de um roteador para a camada de transporte no transmissor TCP, para evitar o problema, tipicamente presente em redes TCP sem fio, de redução indevida na janela de congestionamento do TCP devido a pacotes recebidos com erros de transmissão, embora a caracterização desta solução como *cross-layer* possa ser questionada, dado que as camadas de rede e transporte são adjacentes e que mensagens do tipo ECN já são previstas em determinados tipos de rede, como as redes Frame Relay.

Loops de auto-adaptação, que são protocolos que respondem a eventos observáveis numa mesma camada, não são caracterizados projetos *cross-layer*. Por exemplo, um mecanismo de *fallback* para seleção de taxa de transmissão gera um aumento na taxa quando os pacotes são entregues corretamente, ou uma redução caso contrário. Como a variação da taxa e a verificação dos reconhecimentos são funções da mesma camada (enlace), não se caracteriza um projeto *cross-layer*.

Fluxo de Informação *Downward* – Algumas propostas de projeto de *cross-layer* se baseiam em alterar o valor de alguns parâmetros em camadas inferiores, de forma dinâmica, usando uma interface direta vinda de uma camada superior, como mostrado na Figura 4. Por exemplo, a camada de aplicação pode informar à camada de enlace sobre seus requisitos de atraso, e assim fazer com que a camada inferior altere a persistência do método ARQ para não piorar o atraso dos quadros [9], já que no caso de fluxos em tempo real é melhor se perder alguns quadros que atrasá-los demais.

A proposta em [10] também cria a mesma interface *downward*, porém combinando FEC e ARQ para não perder um quadro inteiro quando houver poucos erros.

Já em [11] a interface é criada entre as mesmas duas camadas, mas os requisitos de atraso da aplicação são convertidos em pesos para o escalonador na camada de enlace. Assim, os quadros de vídeo, os quais têm maiores pesos, serão servidos com prioridade sobre os quadros de um fluxo de menor peso, como HTTP por exemplo.

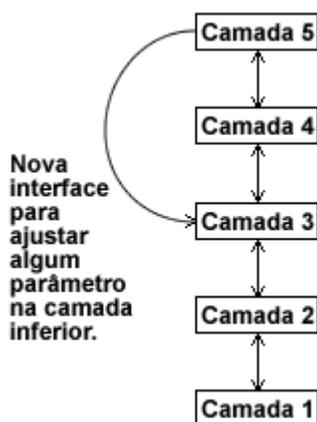


Figura 4: Interface Downward

Uma maneira mais simples de se entender os fluxos *upward* e *downward* é tratá-los como notificações e sugestões, respectivamente, como proposto em [12]. O fluxo de informação *upward* é usado para notificar as camadas superiores a respeito das condições da rede, enquanto o fluxo *downward* serve para sugerir às camadas inferiores como os dados da aplicação devem ser processados.

Fluxo de Informação Back and Forth –

Duas camadas realizando tarefas diferentes podem colaborar uma com a outra dinamicamente. Geralmente isso se manifesta na forma de um *loop* iterativo entre as duas camadas, com informações fluindo entre elas em ambos os sentidos, como mostrado na Figura 5. Claramente a violação de arquitetura nesse caso são as duas novas interfaces complementares.

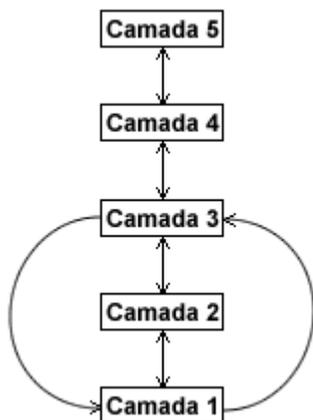


Figura 5: Interface Back and Forth

Por exemplo, a proposta em [13] apresenta um algoritmo de controle de congestionamento baseado em *cross-layer*. O algoritmo numérico encontra a taxa de cada enlace que fornece o melhor benefício possível a todos os usuários, porém a taxa de

transmissão de cada enlace está diretamente relacionada com a potência do nó transmissor e a de seus vizinhos interferentes. Desse modo, a vazão de cada nó deve ser monitorada pela sua própria camada de transporte, alcançando a maior taxa possível sem causar congestionamento, conforme os limites impostos pelas interferências entre vizinhos, medidas pela taxa de erros na camada física. Assim, percebe-se o uso de uma interface *back and forth* entre a camada de transporte, que requererá aumento ou diminuição de taxa em cada enlace, e a união entre a camada de enlace e física, que controla as potências de transmissão, varia as taxas e verifica se é possível manter uma comunicação ponto-a-ponto com aquela potência devido às interferências.

Geralmente, esse tipo de interface aparece em propostas de otimizadores matemáticos que tenham como variáveis parâmetros de duas camadas.

II.3.2. Fusão de Camadas Adjacentes

Outro método de projeto *cross-layer* é unir duas ou mais camadas adjacentes tal que os serviços providos pela nova *supercamada* sejam a união dos serviços de suas camadas constituintes. Esse procedimento não requer a criação de novas interfaces. Com relação à arquitetura, a *supercamada* pode se comunicar com o restante da pilha usando as interfaces já existentes.

Apesar de não haver uma proposta que use explicitamente uma *supercamada*, os projetos colaborativos de camada física e de enlace tendem a ultrapassar a barreira existente entre elas, como no exemplo [13] (em Fluxo de Informação *Back and Forth* da subseção anterior). As novas interfaces entre camadas adjacentes, como no exemplo [7] da subseção anterior (em Fluxo de Informação *Upward*), também podem ser conceitualmente classificadas como fusão entre camadas. Apenas uma análise de desempenho de um protocolo usando uma comunicação direta, via nova interface, e outro que realize uma fusão entre camadas, com um mesmo objetivo na rede e envolvendo as mesmas camadas, pode deixar claro qual tipo de implementação acarreta em melhor desempenho; porém, há uma tendência de que a fusão de camadas se mostra mais vantajosa quando a implementação com nova interface entre as camadas demanda muitas trocas de parâmetros entre elas.

II.3.3. Acoplamentos de Projeto

Durante o projeto de determinado protocolo que opere em uma camada, alguns de seus parâmetros podem ser deixados explícitos para outro protocolo específico que esteja em outra camada. Dessa forma não há criação de novas interfaces, porém esses

protocolos estarão acoplados, impedindo que um deles seja substituído sem acarretar na troca do outro.

Por exemplo, [14] traz o projeto de uma camada de enlace para o *uplink* de uma LAN sem fio onde a camada física é capaz de receber múltiplos pacotes simultaneamente. Nota-se que a nova capacidade da camada física muda o papel da camada de enlace, que deverá ser reprojeta. Em [15] há uma proposta similar onde vários canais OFDM podem ser alocados para um mesmo fluxo caso seja necessário e também pode haver mais de um fluxo simultâneo na camada física, sendo necessário que a camada de enlace seja capaz de lidar com fluxos diferentes vindos da camada inferior.

III.3.4. Calibração Vertical

O último tipo de projeto *cross-layer* que engloba as propostas da literatura é a calibração vertical através das camadas. Como o nome sugere, há ajuste de parâmetros de várias camadas. A motivação, nesse caso, é que a dependência do desempenho visto pela camada de aplicação é uma função dos parâmetros de todas as camadas inferiores a ela. Assim, o ajuste conjunto pode ajudar a se atingir um melhor desempenho que o ajuste dos parâmetros de cada camada isoladamente.

Um trabalho que representa muito bem o conceito de calibração vertical é a arquitetura ECLAIR proposta em [16]. A arquitetura desenvolvida é composta de *camadas de ajuste* e *subsistema de otimização*. As *camadas de ajuste* recebem parâmetros das suas camadas correspondentes na arquitetura e os enviam para os *otimizadores de protocolo*, que são módulos dentro do *subsistema de otimização*. Então, os *otimizadores de protocolo*, que recebem os parâmetros de diferentes combinações das *camadas de ajuste*, calculam os valores ideais desses parâmetros para melhoria do desempenho da rede e os enviam de volta à arquitetura através das *camadas de ajuste*.

Como outro exemplo de calibração vertical há uma proposta [17] na qual os requisitos de atraso da aplicação definem a persistência, ou seja, o número de tentativas de retransmissão em caso de falha na entrega do quadro, do *Automatic Repeat Request* (ARQ) na camada de enlace. Ainda, de acordo com a persistência, a camada física altera a taxa de codificação de acordo com um esquema de modulação adaptativo ao canal.

A calibração vertical pode ser feita de uma maneira estática, o que significa que os parâmetros seriam ajustados durante a fase de projeto de um protocolo para otimizar alguma métrica, ou pode ser feita dinamicamente, o que emula uma pilha de protocolos flexível que responde às variações do canal, tráfego e outras oscilações da rede. Esse dinamismo

requer mecanismos para obter e atualizar os valores dos parâmetros de diferentes camadas que estão sendo otimizados, o que pode causar significativo aumento de *overhead*, além de impor uma conversação constante entre as camadas para se manter o conhecimento dos parâmetros da pilha precisos e atuais.

III.4. Propostas de Implementação das Interações Cross-Layer

O modo como as interações entre as camadas devem ser feitas é considerada na literatura que trata de projetos *cross-layer*. Podem-se distinguir três categorias, explicadas nas subseções seguintes:

1. Comunicação direta entre as camadas;
2. Um banco de dados compartilhado entre as camadas;
3. Novas abstrações.

III.4.1. Comunicação Direta entre as Camadas

Uma forma direta de permitir o compartilhamento de informações entre camadas é permitir que elas se comuniquem por uma nova interface, mesmo entre camadas adjacentes, como ilustrado pelas setas tracejadas na Figura 6. Nota-se que esse método só é aplicável quando há a necessidade de transferência de dados entre camadas dinamicamente. Na prática, comunicação direta entre as camadas significa tornar as variáveis de uma camada visíveis para outras.

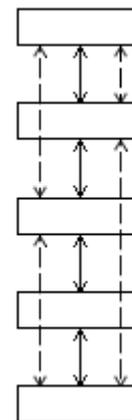


Figura 6: Comunicação Direta entre Camadas

Há muitos modos de se realizar uma comunicação entre camadas. Por exemplo, cabeçalhos de protocolos podem ser usados para permitir fluxo de informação entre camadas. Em [18] há uma proposta de arquitetura chamada CLASS (*Cross-Layer Signaling Shortcuts*) que permite que quaisquer duas camadas se comuniquem.

O artigo [11] mostra um algoritmo *cross-layer* onde os pesos dos escalonadores WFQ (*Weighted Fair Queuing*) na camada de enlace, responsáveis por dar o direito de transmissão aos quadros em uma fila, são determinados pela camada de aplicação de acordo com o tipo de fluxo levado pelos quadros, como e-mail, voz ou vídeo, o que evidencia uma comunicação direta entre as camadas de enlace e aplicação.

O trabalho [19] apresenta uma comunicação direta entre a camada de enlace e a física. Cada novo fluxo de dados possui um *deadline* analisado por um algoritmo na camada de enlace que determina a velocidade de processamento mínima que pode ser utilizada pelo dispositivo para que não se ultrapasse seu limite de tempo. Essa proposta reduz o consumo de energia em redes de sensores sem fio.

Os exemplos [6], [7], [8], [9], [10] e [11] citados na subseção III.3.1. *Criação de Novas Interfaces* foram implementados por uma comunicação direta entre as camadas. Novas interfaces também podem ser implementadas por bancos de dados compartilhados, que são a proposta de implementação explicada na subseção seguinte. O artigo [13], que foi também citado em III.3.1., é um exemplo de comunicação direta feita através de um banco de dados compartilhado.

As propostas emergentes usam pouco fluxo de informação entre as camadas, de forma que as arquiteturas em camadas ainda possam ser utilizadas sem modificações significativas.

III.4.2. Banco de Dados Compartilhado

Outra classe de propostas mostra um banco de dados que pode ser acessado por todas as camadas, como ilustrado na Figura 7. De certa forma, o banco de dados comum é como uma nova camada que oferece o serviço de armazenamento/recuperação de parâmetros para todas as camadas, permitindo a transferência deles entre quaisquer camadas.

Essa abordagem é adequada para calibrações verticais, como o exemplo em [16] citado anteriormente. Um programa de otimização pode se comunicar com camadas diferentes ao mesmo tempo através do banco de dados, ou novas interfaces podem ser concretizadas pelo banco. O principal desafio nesse caso é projetar as interações entre as camadas e o banco de dados.

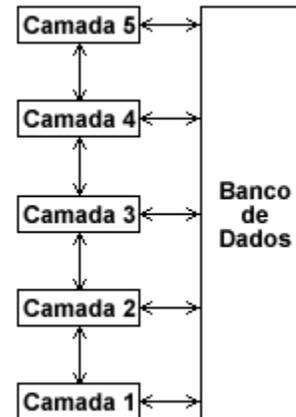


Figura 7: Banco de Dados Compartilhado

Grande parte das propostas que visam maximização da utilidade agregada, que é o fornecimento de taxas justas a todos os usuários da rede de acordo com a importância de suas transmissões, sugerem o uso de um banco de dados compartilhado e centralizado, ou seja, um banco de dados que tenha acesso a todos os parâmetros da rede, como em [9] e [20]-[30]. Os trabalhos citados mostram que é possível atingir um estado ótimo da rede, evitando-se os congestionamentos e estouros de *buffers*, porém a complexidade da implementação dessas propostas cresce exponencialmente com o tamanho da rede [31], o que pode tornar os cálculos de otimização lentos e a atuação do otimizador na rede impossível. Tendo conhecimento dessa limitação, o trabalho em [32] mostra que seguindo o conceito original de banco de dados compartilhado, que propõe que esse banco exista em cada nó e não apenas em um nó otimizador, não se pode chegar ao estado ótimo da rede. Porém, além de tornar a implementação factível e independente do tamanho da rede, a análise do comportamento dessa proposta distribuída mostrou que os ganhos de desempenho em redes dinâmicas, onde nós entram e saem da rede e transmissões começam e terminam com muita frequência, foram maiores que no caso da abordagem centralizada.

III.4.3. Novas Abstrações

O terceiro conjunto de propostas apresenta novas abstrações, como mostrado esquematicamente na Figura 8. Por exemplo, a proposta [33] não utiliza uma pilha, mas sim *roles* (papéis, tarefas). *Role* é um módulo que possui a descrição das funções que devem ser realizadas quando esse bloco for implementado. Pode-se compará-lo a uma camada, porém cada *role* possui apenas um objetivo definido, enquanto camadas definem conjuntos de serviços.

remontar um pacote, o destinatário pode corrigir os erros do pacote graças ao FEC, como mostrado em [35] e [43].

Rede: Em [44], de forma diferente das redes sem fio *multihop* convencionais, são formados enlaces MISO (*Multiple In Single Out* – um dispositivo com várias antenas transmite para outro com apenas uma antena receptora) virtuais, que são enlaces de maior distância os quais utilizam um conjunto de nós vizinhos na transmissão de um dado, sendo que cada um possui apenas uma antena. A camada de enlace é responsável por decidir os vizinhos que participarão nas transmissões, enquanto a camada de rede tenta detectar a mensagem enviada sendo encaminhada até o destino. Caso consiga, então se conclui que há um nó mais próximo do destino dentro do alcance do enlace MISO virtual e, assim, ele pode passar a receber as próximas mensagens para serem encaminhadas ao destino, reduzindo o número de nós atravessados até o destino. Isso reduzirá o atraso no encaminhamento e evidencia que o roteamento está ligado à formação do enlace MISO virtual pela camada de enlace.

III.5.3. Camada de Rede

As informações disponíveis na camada de rede são tabelas de roteamento, endereço e a interface de rede em uso.

Aplicação: As tecnologias usadas em redes P2P (*Peer-to-Peer*) não se mostraram eficientes em redes *ad hoc*. No artigo [45] há uma proposta de API (*Application Programming Interface* – conjunto de funções disponibilizadas por uma biblioteca para as aplicações que desejem usar seus serviços) que cria uma nova interface da camada de aplicação para a de rede. Essa interface *downward* permite que aplicações enviem mensagens através dos pacotes de roteamento, o que permite uma distribuição eficiente do conteúdo disponibilizado pelos *seeds* da rede P2P.

Um dispositivo pode ter múltiplas interfaces de rede sem fio que podem prover diferentes níveis de serviço. Por exemplo, uma interface de rede local sem fio pode prover menores atrasos e maior vazão quando comparada a uma GPRS num mesmo dispositivo [34]. Dependendo das necessidades da aplicação, a camada de rede pode selecionar a interface de rede adequada, porém, mudar a transferência de dados de uma interface para outra durante uma sessão sem interrompê-la é uma área de pesquisa ainda não explorada.

Transporte: O otimizador matemático proposto em [46] decide a rota até o destino de acordo com a taxa de transmissão atingível e o congestionamento daquela rota.

III.5.4. Camada de Transporte

O TCP disponibiliza as informações de *Round-Trip Time* (RTT), RTO, MTU, janela de recepção, janela de congestionamento, número de pacotes perdidos e vazão atual.

Aplicação: Aplicações podem indicar seus requisitos de QoS para o TCP que, então, pode manipular as janelas de recepção [34]. Por outro lado, o TCP pode prover informações de perda de pacotes e vazão para a aplicação que, assim, pode ajustar sua taxa de geração de dados a serem transmitidos. Em [47], o UDP-Lite, uma versão do UDP que realiza *checksum* apenas nos campos de cabeçalho, é usado para fluxos em tempo real, onde é melhor receber pacotes com erros apenas no *payload* que não recebê-los devido a erros de cabeçalhos.

III.5.5. Camada de Aplicação

Informações disponibilizadas pela camada de aplicação são os requisitos de QoS: como tolerância a atrasos, *jitter* aceitável, vazão requerida e perda de pacotes tolerável. Suas relações com as outras camadas já foram evidenciadas pelas subseções anteriores.

III.6. Pesquisas Subseqüentes

Novamente baseado em [5], esta seção tratará de dois tipos de problemas no projeto *cross-layer*: questões importantes sobre o projeto *cross-layer* que não estão sendo abordados pela literatura atual e questões referentes à natureza dos meios sem fio e que influenciam as funcionalidades das arquiteturas para meios sem fio. A seguir serão detalhados os principais problemas com uma breve discussão a respeito de como poderão ser abordados no futuro.

III.6.1. Acoplamentos Cross-Layer Importantes

Existe um grande número de propostas de projeto *cross-layer* hoje, mas não é claro quais delas são mais importantes. Para classificá-las em importância, uma análise de custo/benefício de diferentes propostas em termos de complexidade versus ganho de desempenho se faz necessária. Hoje, as seguintes inferências podem ser feitas da literatura: o projeto *cross-layer* é necessário entre as camadas de rede e enlace para redes *ad hoc* uma vez que as funcionalidades dessas camadas devem interagir; notificações explícitas por novas interfaces para a camada de transporte melhoram o desempenho fim-a-fim; fazer uso de conhecimento do estado do canal na camada de enlace permite uso oportunista do canal e melhora o desempenho, e; energia, atraso e problemas relacionados a segurança precisam ser manipulados

através de todas as camadas de uma forma cooperativa. A evolução de estudos cooperativos nessa área depende de estudos comparativos qualitativos de diferentes propostas, o que se mostra uma área de pesquisa promissora. As propostas mais recentes, como [19], [40], [48] e [49], já trazem alguma comparação com outras anteriores e com as tecnologias que operam nas redes para que fique evidente o ganho de desempenho atingido pelo novo trabalho. Porém, o número de comparações é muito pequeno em relação ao número de propostas *cross-layer* existentes, o que evidencia uma área de pesquisa pouco abordada.

III.6.2. Coexistência de Propostas de Projeto Cross-Layer

Uma questão importante é como diferentes propostas podem coexistir.

A questão da coexistência de idéias é pertinente quando se deve determinar se haverá inovação ao serem unidas, e se realmente trarão ganho de desempenho. Por exemplo, suponha uma proposta que otimize alguma métrica com um projeto *cross-layer* entre as camadas física e de enlace. Se esse esquema for utilizado, outras propostas poderão ser usadas no mesmo sistema, tanto utilizando *cross-layer* entre camadas superiores quanto com as que já fazem parte do projeto *cross-layer* original? O uso de outras propostas em conjunto com a original trará ganho de desempenho?

Além de apresentarem novas idéias de projeto, é importante investigar como propostas diferentes poderão coexistir e qual o resultado desta coexistência.

III.6.3. Quando Utilizar um Projeto Cross-Layer Específico

As condições de uma rede sem fio são variantes com o tempo. Em tal situação, uma das motivações por trás dos projetos *cross-layer* é atingir em redes o equivalente ao casamento de impedâncias em circuitos. A idéia central é tornar a pilha de protocolos ágil em resposta a variações das condições da rede tal que o ponto de operação ótimo seja sempre mantido. Para se atingir esse objetivo, outros dois desafios devem ser superados: deve-se verificar quais são as condições da rede em que o projeto *cross-layer* apresenta ganho de desempenho e deve-se criar mecanismos eficientes que interajam no momento crucial de mudança de estado na rede, além de agirem sobre os parâmetros apropriados nas camadas cuidando para que o aumento do fluxo de informação entre elas não cause uma degradação de desempenho.

III.6.4. Padronização de Interfaces

A principal vantagem que a divisão em camadas trouxe foi apresentar fronteiras e interfaces bem definidas entre os módulos do sistema para facilitar o projeto de protocolos, que eram dependentes apenas de parâmetros de camadas adjacentes. Agora que a estrutura em camadas está sendo violada de diferentes formas, encontrar uma nova arquitetura torna-se um desafio. Quais devem ser os novos limites entre os módulos? Deve-se manter as fronteiras e criar novas interfaces, mudar os limites das camadas ou usar uma combinação de ambos métodos? Como devem ser as interfaces?

Abordar esse problema requer grande sinergia entre o ponto de vista de desempenho e o de implementação. Basicamente, a organização dos módulos e das interfaces entre si determina quão eficientemente as informações podem ser compartilhadas. Desse modo determina-se também quão eficiente pode ser uma proposta de projeto *cross-layer* dependente de compartilhamento dinâmico de informações. Ainda, deve-se considerar o impacto dos atrasos na busca/atualização dessas informações, em propostas que utilizem fluxo de informações *back and forth* e calibrações verticais, no desempenho dos protocolos.

III.6.5. O Papel da Camada Física

Em redes cabeadas, o papel da camada física era simples: enviar e receber bits quando era requisitada por camadas superiores. Como visto anteriormente, os avanços no processamento de sinais da camada física permitem que ela desempenhe um papel muito maior nas redes sem fio. Isso traz uma nova preocupação: quanto esforço deve ser despendido no desenvolvimento da camada física? Os desenvolvimentos nessa camada devem ser balanceados com as mudanças correspondentes em outras camadas. Desse modo, a pesquisa avançada na área de processamento de sinais torna-se um campo de estudo importante para as propostas *cross-layer*.

III.6.6. Otimizadores Matemáticos

Muitas propostas, como [13], [21]-[23], [26], [28], [50] e [51] trazem otimizadores puramente matemáticos que se utilizam de programação linear, não-linear ou inteira, teoria de jogos, cadeias de Markov, entre outros métodos, com desempenho testado em simulações ou cálculos computacionais. Alguns deles foram classificados nesse tutorial, porém verifica-se que a classificação é questionável, sendo que podem fazer parte de mais de uma classe. Ainda, tais trabalhos não consideram implementações dos

algoritmos propostos, o que os distancia da prática. Assim, surgem algumas questões:

- Dentre as classificações apresentadas, onde se encaixam esses otimizadores?
- As implementações devem ser feitas por comunicação direta entre camadas ou banco de dados compartilhado?
- Deve-se criar uma nova classificação para esses otimizadores?
- A maioria das propostas sugere um otimizador que conheça os parâmetros de toda a rede. Isso é factível? Para redes compostas por até quantos nós?
- Quanto se perde do desempenho ótimo ao tornar os algoritmos distribuídos entre os nós da rede? E quanto isso facilita sua implementação?

Responder essas perguntas requer uma gama de novos trabalhos que testem e analisem os otimizadores matemáticos.

III.6.7. Economia de Energia

Como será discutido, as propostas que envolvem redes de sensores sem fio têm como principal desafio manter a rede funcionando pelo maior tempo possível, e para isso foram criadas muitas propostas visando economia de energia dos dispositivos. Porém, em qualquer rede que possua dispositivos móveis, essas propostas poderiam ser aplicadas.

A maior parte das propostas combina o escalonamento dos pacotes com o desligamento de algumas funcionalidades dos nós para economia de energia, como em [19], [24], [30], [36] e [52]. Algumas outras propostas vão além e tentam realizar um roteamento ótimo para economia de energia através de um novo protocolo ou pela otimização de um existente, como visto em [29], [35] e [53]. Ainda, um projeto *cross-layer* foi encontrado em [35] visando a economia de energia pelos mesmos métodos já citados, porém ainda com codificação de vídeo ajustada para economizar energia de acordo com a qualidade do canal.

Já que as propostas estudadas levam em consideração todas as camadas exceto a de transporte, por que não propor um otimizador único através de um banco de dados compartilhado que seja capaz de realizar todas as otimizações mencionadas? O estudo dessa questão geraria resultados interessantes que poderiam ser empregados em todas as redes com dispositivos móveis, principalmente redes de sensores sem fio.

III.6.8. O Melhor Modelo de Comunicações

O último desafio está relacionado com o modelo de comunicação assumido. Redes cabeadas são, por natureza, um conjunto de enlaces de comunicação ponto-a-ponto. O mesmo não pode ser dito das redes sem fio, já que o meio sem fio é inerentemente *broadcast* e não há um conceito definido de enlace como nas redes cabeadas. Esse fato levanta a seguinte questão: ainda faz sentido “criar” enlaces em redes sem fio? Alguns estudos recentes, como em [44], fizeram uso do meio sem fio para gerar esquemas de comunicação inovadores, explorando a cooperação entre os nós comunicantes.

Essas novas modalidades oferecidas pelos meios sem fio não podem ser estruturadas segundo um modelo em camadas, requerendo projetos *cross-layer*. Assim, acredita-se que ao serem propostos projetos para superarem os problemas gerados pelo meio sem fio, também se deve atentar às oportunidades que esse meio oferece.

IV. Tipos de Redes *Cross-Layer*

Diferentes tecnologias de rede são alvo das otimizações *cross-layer*. Essa seção visa enumerar os tipos de redes que aparecem com mais frequência nas propostas existentes, com alguns exemplos retirados da literatura atual.

IV.1. MANETs

MANETs (*mobile ad hoc networks*) são redes compostas de nós móveis que podem atuar como geradores ou roteadores de tráfego. Em [54] é proposta uma alteração do algoritmo de roteamento AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*). Os cabeçalhos dos pacotes foram alterados, recebendo novos campos que dividem os fluxos de informação em quatro níveis de importância, tratam da entrada e saída de nós da rede e contêm informações sobre o ajuste de potência na camada física, sendo que a potência também depende do nível de importância do fluxo. A topologia, descoberta em instantes de tempo definidos devido à mobilidade dos nós, também influencia nas potências de transmissão.

O artigo [55] propõe a formação de grupos de nós com interesse numa mesma aplicação. Dessa forma, a mobilidade dos nós não causará desconexões, a menos que o dispositivo saia do alcance de todos os outros interessados no mesmo tipo de serviço.

Como se pode perceber dos exemplos anteriores e de outros, como [24], [44], [45], [49] e [56]-[59], a conectividade é sempre tratada pela

abordagem *cross-layer*, já que os nós em movimento causam constantes mudanças na topologia da rede.

IV.2. WSNs

WSNs (*Wireless Sensor Networks*) são redes formadas por sensores sem fio, geralmente sem mobilidade, em que os nós sensores atuam de forma cooperativa para que informações provenientes de nós que estejam fora do alcance do nó central de processamento possam alcançar este nó. O algoritmo proposto em [19] encontra o melhor escalonamento e mapeamento de tarefas de processamento em cada sensor para atingir uma economia de energia, concretizada pelo DVS (*Dynamic Voltage Scaling*), que diminui a tensão aplicada aos processadores dos sensores quando puderem realizar suas tarefas mais lentamente e a aumenta quando há limites de atraso.

Em [36] há preocupação quanto ao congestionamento que ocorre nos nós mais próximos do nó central quando eles têm que encaminhar dados de muitos outros sensores distantes. Através de prioridades e da separação entre tráfegos gerados num nó e tráfegos encaminhados por ele consegue-se uma maior justiça e aumento da vazão da rede de sensores.

Mais alguns exemplos estão expostos em [26], [29], [30], [35], [37], [48], [53], [60] e [61]. Da análise deles se percebe que a maior preocupação em redes de sensores sem fio é a escassez de recursos, principalmente de bateria.

IV.3. 802.11

O IEEE 802.11, também conhecido como *Wi-Fi*, tem sido considerado em muitas propostas *cross-layer*, como em [6], [52], [54] e [62]-[74].

Como citado na Subseção III.3.1, em *Fluxo de Informação Upward*, o artigo [6] aumenta a qualidade do vídeo transmitido usando sinalização *cross-layer* em redes 802.11.

Os estudos referenciados por [72] mostraram uma anomalia em redes 802.11. Quando existem fluxos de diferentes taxas, sendo que alguns deles estão lentos devido à má qualidade do canal, todos os fluxos num AP (*Access Point*) ficam com a taxa reduzida para um valor em torno da menor taxa. O algoritmo proposto no mesmo artigo, o AMCLM (*Adaptive Multi-services Cross-Layer MAC protocol*) não permite que usuários que experimentam uma má qualidade do canal acessem a rede quando houver usuários com canais de boa qualidade transmitindo.

A proposta *cross-layer* de [74] visa medir a qualidade dos canais e o número de usuários conectados a um AP em uma rede *mesh*. Com as métricas citadas, os usuários que queiram se conectar a

rede selecionam o AP com menor utilização e com o qual conseguem uma comunicação com menos erros.

Os estudos têm evidenciado que as implementações atuais das redes 802.11 não são capazes de garantir QoS, e que a eficiência em termos de vazão para os usuários que utilizam essas redes é muito baixa. As pesquisas nessa área podem trazer contribuições importantes para essa tecnologia, que é a base das redes locais sem fio de hoje.

IV.4. 802.16e

O Mobile *WiMAX*, ou IEEE 802.16e, tem sido considerado na literatura como principal tecnologia para acesso sem fio em banda larga (MBWA – *Mobile Broadband Wireless Access*).

A proposta em [75] apresenta um otimizador para *MobileTV*, um mecanismo de *broadcasting* de canais de TV para dispositivos móveis, que visa melhorar a QoS, a cobertura do sinal de uma célula e a eficiência espectral com base na medição de pacotes de vídeo recebidos pelos dispositivos móveis.

A alocação de canais e escalonamento dos pacotes em tempo real são as preocupações do otimizador proposto em [76].

Desses trabalhos e de [39] percebe-se que a maior preocupação das propostas que envolvem *WiMAX* móvel é prover QoS, principalmente para tráfegos multimídia.

IV.5. 802.15.4

O IEEE 802.15.4 define os padrões de camada física e de enlace para operação em redes pessoais sem fio (WPANs – *Wireless Personal Area Networks*). Exemplos do uso desse padrão com propostas *cross-layer* podem ser encontrados em [36], [37] e [53], sendo que todas elas otimizam redes de sensores sem fio (explicadas na subseção IV.2).

A proposta [36] traz níveis intermediários de LPM (*Low Power Mode* – operação com consumo de energia reduzido) para economizar energia em redes de sensores usando enlaces 802.15.4. Os trabalhos anteriores economizavam energia nos dispositivos desligando-os por períodos de tempo onde não haveria recepção de dados, porém ao empregar o 802.15.4, com taxas de 205 kbps, mais altas que as utilizadas anteriormente, desligar os dispositivos não é mais uma opção, já que muitos pacotes seriam perdidos devido ao tempo de desligamento e ligamento. Dessa forma, os níveis intermediários, que não desligam todas as operações dos dispositivos, podem trazer uma economia do consumo, sem acarretar em perdas para a rede.

O trabalho [37] traz um projeto *cross-layer* que visa a economia de energia e o controle de acesso

para que não haja colisões, mantendo um número máximo de sensores ativos simultaneamente na rede.

Como as propostas que utilizam o padrão 802.15.4 tratam de redes de sensores sem fio, os projetos *cross-layer* visam as mesmas otimizações de recursos já citadas na subseção IV.2.

IV.6. Redes Celulares

Em [77], há uma proposta *cross-layer* que considera os diferentes tipos de acesso, CDMA em redes 3G e OFDMA em redes 4G, e como prover melhor transmissão de vídeo otimizando a alocação de canais e potência de transmissão para os usuários de acordo com a qualidade do canal e tentando manter um equilíbrio entre justiça e eficiência.

O artigo [78] propõe a comunicação *cross-layer* RNF (*Radio Network Feedback*) entre o RNC (*Radio Network Controller*) e o emissor TCP. Quando há mudança na qualidade do canal, a banda que pode ser utilizada também muda, o que gera uma mensagem RNF para o emissor, que deverá reduzir sua taxa de transmissão. Uma mensagem com mesma função é enviada quando os *buffers* no RNC ultrapassam um limiar determinado. Essa proposta é capaz de manter a vazão no mesmo patamar em que estaria caso apenas o TCP Reno fosse utilizado, porém com ocupação das filas muito menor.

O trabalho [79] propõe o CLPS (*Cross-Layer Packet Scheduler*) que escalona os pacotes em redes celulares de acordo com a qualidade do canal percebida, aumentando a eficiência em termos de pacotes perdidos.

Dos exemplos citados, percebe-se que as propostas *cross-layer* em redes celulares visam a alocação de canais considerando o estado do canal e a interoperabilidade entre a rede e as redes TCP/IP.

IV.7. VANETs

VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*) são similares às MANETs, porém a mobilidade dos nós pode alcançar altas velocidades. Na proposta em [80], que também utiliza o AODV como protocolo de roteamento, o efeito *Doppler* sofrido pelos pacotes de roteamento *broadcast* são medidos por um veículo, determinando se o veículo mais próximo está se deslocando na mesma direção ou na oposta. Caso esteja na direção oposta e haja informação para ser transmitida para aquele nó, os pacotes recebem uma indicação de prioridade e, quando ele for quebrado em quadros na camada de enlace, também receberão uma indicação de prioridade no escalonamento. Tal abordagem reduz a perda de pacotes causada pelo pouco tempo de transmissão entre veículos em direções opostas.

V. Outros Conceitos de *Cross-Layer*

Algumas das propostas encontradas na literatura empregam o termo *cross-layer* para projetos que não envolvem a violação da arquitetura em camadas, mas sugerem interações diferentes, ou empregam o termo “camada” em outros sentidos. Em seguida serão discutidos esses conceitos diferentes de *cross-layer*.

V.1. Ataque *Cross-Layer*

Um ataque *cross-layer* é a alteração de algum parâmetro em uma das camadas por um usuário malicioso visando prejudicar algum outro parâmetro de outra camada.

Por exemplo, os artigos [81] e [82] mostram que as estações de uma rede 802.11 usando DCF (*Distributed Coordination Function*), quando têm algum dado para transmitir, devem aguardar um tempo aleatório e então enviar um quadro RTS (*Request To Send*) para o AP para requisitarem o uso do canal. Uma estação maliciosa pode reduzir esse tempo aleatório de forma que tenha uma grande probabilidade de reservar o canal, evitando que outras possam transmitir. Essa violação na camada de enlace visa o *timeout* TCP das estações, impedindo que acessem o meio e transmitam. Ambos artigos citados propõem técnicas de detecção para esses ataques.

V.2. Camadas de Transporte

Alguns trabalhos consideram uma sinalização entre a “camada” sem fio e a “camada” óptica que transporta o tráfego para outras redes.

O artigo [83] mostra como prover o acesso sem fio a usuários se deslocando em altas velocidades dentro de metrô. A rede sem fio opera sobre uma rede de transporte óptica. Como os usuários estão se movendo, a proposta *cross-layer* cuida do *handoff*, avisando aos equipamentos da “camada” sem fio de qual comprimento de onda os pacotes de determinado fluxo vêm ou em qual comprimento de onda colocar os pacotes do fluxo de um usuário.

Em [21] a preocupação é rotear os pacotes IP de uma origem a um destino em uma rede IP sobre SONET, evitando falhas que podem ocorrer em ambas “camadas”.

VI. Conclusão

A pesquisa sobre *cross-layer* é uma área que tem recebido muita atenção nos últimos anos. Com o intuito de melhorar as comunicações sem fio, novos *frameworks* matemáticos e/ou algorítmicos, implementações e testes têm sido feitos para se chegar a uma solução ótima, capaz de operar em redes que utilizem quaisquer das tecnologias sem fio existentes. Os esforços ainda não agem em sinergia e visam atuar sobre diferentes aspectos e diferentes camadas da arquitetura das redes, sobretudo da arquitetura TCP/IP, gerando um grande número de soluções específicas. Serão necessários mais estudos sobre as soluções já propostas e sobre as que surgirem para padronizar os projetos *cross-layer* de modo que se possa ter de volta pelo menos parte da facilidade e independência no desenvolvimento de protocolos, as quais existiam na definição original das arquiteturas em camadas.

VII. Referências

- [1] Day, J.D. and Zimmermann, H., "The OSI Reference Model", *Proceedings of the IEEE*, vol. 71, December 1983, pp. 1334-1340.
- [2] Tanenbaum, Andrew S., *Computer Networks*, 4th ed., Prentice Hall, 2003.
- [3] Mendes, L. D. P. and Brito, J. M. C., "Some Analysis of a Cross-Layer Design for a Wireless TCP Network", *Proc. on International Conference on Wireless and Mobile Communications – ICWMC 2009*.
- [4] Mitola III, Joseph and Maguire Jr, Gerald Q. "Cognitive Radio: Making Software Radios more Personal", *IEEE Personal Communications Magazine*, August 1999, pp. 13-18.
- [5] Srivastava, Vineet and Motani, Mehul, "Cross-Layer Design: A Survey and the Road Ahead," *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, December 2005, pp. 112-119.
- [6] L. Haratcherev, J. Taal, K. Langendoen, R. Legendijk, H. Sips, "Optimized video streaming over 802.11 by cross-layer signaling", *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, issue 1, Jan. 2006, pp. 115-121.
- [7] Z. Ji, Yi Yang, Junlan Zhou, Mineo Takai, Rajive Bagrodia, "Exploiting Medium Access Diversity in Rate Adaptive Wireless LANs", *Proc. ACM Annual Int'l Symp Mobile Comp. and Net. 2004*.
- [8] S. Shakkottai, T. S. Rappaport, P. C. Karlsson, "Cross-Layer Design for Wireless Networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, issue 10, Oct. 2003, pp. 74-80.
- [9] Dalei Wu, Song Ci, Haohong Wang, "Cross-Layer Design for Multimedia Delivery over Wireless Networks", Eighth IEEE International Symposium on Multimedia 2006, pp. 407-414.
- [10] A. Abd El Al, T. Saadawi, Myung Lee, "A cross-layer optimized error recovery mechanism for real-time video in ad-hoc networks", *12th International Conference on Parallel and Distributed Systems 2006*, vol. 2, 6 pp.
- [11] Xiao-hui Li, Ming Han, Ke-chu Yi, Chang-xing Pei, Nai-an Liu, "Radio Resource Management Algorithm Based on Cross-Layer Design for OFDM Systems", *Proceedings of the Seventh International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies 2006*, pp. 311-314.
- [12] L. Larzon, U. Bodin, O. Schelen, "Hints and Notifications", *Proc. IEEE Wireless Commun. And Net. Conf. 2002*, pp. 635-641.
- [13] X. Lin, N. B. Shroff, R. Srikant, "A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, issue 8, Aug. 2006, pp. 1452-1463.
- [14] L. Tong, V. Naware, P. Venkatasubramaniam, "Signal Processing in Random Access", *IEEE Sig. Proc.*, vol. 21, issue 5, Sept. 2004, pp. 29-39.
- [15] Mathias Bohge, James Gross, Adam Wolisz, Michael Meyer, "Dynamic resource allocation in OFDM systems: an overview of cross-layer optimization principles and techniques", *IEEE Network*, vol. 21, issue 1, Feb. 2007, pp. 53-59.
- [16] V.T. Raisinghani, S. Iyer, "Cross-layer feedback architecture for mobile device protocol stacks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, issue 1, Jan. 2006, pp. 85-92.
- [17] Q. Liu, S. Zhou, G. B. Giannakis, "Cross-Layer Combining of Adaptive Modulation and Coding with Truncated ARQ Over Wireless Links", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, issue 5, Sept. 2004, pp. 1746-1755.
- [18] Q. Wang, M. A. Abu-Rgheff, "Cross-Layer Signalling for Next-Generation Wireless Systems", *Proc. IEEE Wireless Commun. And Net. Conf. 2003*, pp. 1084-1089.
- [19] Yuan Tian, Eylem Ekici, "Cross-Layer Collaborative In-Network Processing in Multihop Wireless Sensor Networks", *Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, issue 3, March 2007, pp. 297-310.
- [20] Dalei Wu, Song Ci, Haohong Wang, "Cross-Layer Optimization for Video Summary Transmission over Wireless Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, issue 4, May 2007, pp. 841-850.
- [21] Y. Liu, D. Tipper, K. Vajanapoom, "Spare Capacity Allocation in Two-Layer Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, issue 5, June 2007, pp. 974-986.
- [22] J. Yuan, Z. Li, W. Yu, B. Li, "A Cross-Layer Optimization Framework for Multihop Multicast in Wireless Mesh Networks", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, issue 11, Nov. 2006, pp. 2092-2103.
- [23] M. Johansson, L. Xiao, "Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.5, issue 2, Feb. 2006, pp. 435-445.
- [24] Xia, Xincheng and Liang, Qilian, "Cross-Layer Design for Mobile Ad Hoc Networks Using Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems," *Global Telecommunications Conference*, November 2006, pp. 1-6.
- [25] T. Ozcelebi, M. Oguz Sunay, A. Murat Tekalp, M. Reha Civanlar, "Cross-Layer Optimized Rate Adaptation and Scheduling for Multiple-User Wireless Video Streaming", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, issue 4, May 2007, pp. 760-769.
- [26] Jun Yuan, Wei Yu, "Distributed Cross-Layer Optimization of Wireless Sensor Networks: A Game Theoretic Approach", *IEEE Global Telecommunications Conference 2006*, pp. 1-5.
- [27] Ying Jun Zhang, K.B. Letaief, "Cross-Layer Adaptive Resource Management for Wireless Packet Networks With OFDM Signaling", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, issue 11, Nov. 2006, pp. 3244-3254.
- [28] Jia Liu, Tae Yoon Park, Y.T. Hou, Yi Shi, H.D. Sherali, "Cross-Layer Optimization of MIMO-Based Mesh Networks Under Orthogonal Channels", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007*, pp. 49-54.
- [29] R. Madan, Shuguang Cui, S. Lall, N.A. Goldsmith, "Cross-Layer Design for Lifetime Maximization in Interference-Limited Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5, issue 11, Nov. 2006, pp. 3142-3152.
- [30] J. Zhu, S. Chen, B. Bensaou, K.-L. Hung, "Tradeoff Between Lifetime and Rate Allocation in Wireless Sensor Networks: A

- Cross Layer Approach”, IEEE 26th IEEE International Conference on Computer Communications 2007, pp. 267-275.
- [31] Hsien-Po Shiang, M. van der Schaar, “Multi-user Video Streaming over Multi-hop Wireless Networks: A Cross-Layer Priority Queuing Scheme”, International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing 2006, pp. 255-258.
- [32] Xiaojun Lin, Ness B. Shroff, “The impact of imperfect scheduling on cross-layer congestion control in wireless networks”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 14, issue 2, April 2006, pp. 302-315.
- [33] T. R. Braden, M. Handley, “From Protocol Stack to Protocol Heap – Role-Based Architecture”, *Proc. Hot Topics in Net.*, Mar. 2002.
- [34] Raisinghani, Vijay T. and Iyer, Sridhar, “Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks,” *Computer Communications*, vol. 27, May 2004, pp. 720-724.
- [35] Hojong Kwon, Tae Hyun Kim, Sunghyun Choi, Byeong Gi Lee, “A cross-layer strategy for energy-efficient reliable delivery in wireless sensor networks”, IEEE transactions on wireless communications, vol.5, no. 12, 2006, pp. 3689-3699.
- [36] M.I. Brownfield, A.S. Fayed, T.M. Nelson, N. Davis IV, “Cross-layer wireless sensor network radio power management”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2006, pp. 1160-1165.
- [37] J. Mistic, S. Shafi, V.B. Mistic, “Cross-layer activity management in an 802-15.4 sensor network”, IEEE Communications Magazine, vol. 44, issue 1, Jan. 2006, pp. 131 – 136.
- [38] Qinghe Du, Xi Zhang, “Cross-Layer Resource-Consumption Optimization for Mobile Multicast in Wireless Networks”, International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2006, pp. 368-376.
- [39] Hung-Hui Juan, Hsiang-Chun Huang, ChingYao Huang, Tihao Chiang, “Cross-layer System Designs for Scalable Video Streaming over Mobile WiMAX”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007, pp. 1860-1864.
- [40] Dandan Hao, Shihong Zou, Boubakar Kimba Dit Adamou, Shiduan Cheng, “A QoS Guaranteed Cross-Layer Scheduling Algorithm in Wireless Networks”, Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications 2007, pp. 62-67.
- [41] D. Wu, Song Ci, H. Sharif, Yang Yang, “Packet Size Optimization for Goodput Enhancement of Multi-Rate Wireless Networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007, pp. 3575-3580.
- [42] S. L. Kota, “Cross-Layer Design Challenges for Quality of Service Guarantees in Satellite Networks”, Military Communications Conference 2006, pp. 1-7.
- [43] Weiyan Ge, Junshan Zhang, Sherman Shen, “A cross-layer design approach to multicast in wireless networks”, IEEE transactions on wireless communications, vol. 6, no. 3, 2007, pp. 1063-1071.
- [44] Srikanth V. Krishnamurthy, Michalis Faloutsos, Prashant V. Krishnamurthy, Ozgur Ercetin, Gentian Jakllari, “A Cross-Layer Framework for Exploiting Virtual MISO Links in Mobile Ad Hoc Networks”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 6, issue 6, June 2007, pp. 579-594.
- [45] Franca Delmastro, Marco Conti, Enrico Gregori, “P2P Common API for Structured Overlay Networks: A Cross-Layer Extension”, *Proceedings of the 2006 International Symposium on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 593-597.
- [46] L. Chen, S. H. Low, M. Chiang, J. C. Doyle, “Cross-Layer Congestion Control, Routing and Scheduling Design in Ad Hoc Wireless Networks”, Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications 2006, pp. 1-13.
- [47] Z. Chen, “A CUSTOMIZABLE QOS STRATEGY FOR CONVERGENT HETEROGENEOUS WIRELESS COMMUNICATIONS”, IEEE Wireless Communications, vol. 14, issue 12, April 2007, pp. 20-27.
- [48] Gianluca Moro, Gabriele Monti, “W-Grid: a Cross-Layer Infrastructure for Multi-Dimensional Indexing, Querying and Routing in Wireless Ad-Hoc and Sensor Networks”, Sixth IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing 2006, pp. pp. 210-220.
- [49] Xuefei Li, L. Cuthbert, “Node-Disjoint Multipath Routing and Distributed Cross-Layer QoS Guarantees in Mobile Ad hoc Networks”, Seventh ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing 2006, pp. 243- 248.
- [50] B. Johansson, P. Soldati, M. Johansson, “Mathematical Decomposition Techniques for Distributed Cross-Layer Optimization of Data Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 24, issue 8, Aug. 2006, 1535-1547.
- [51] Seung-Jun Kim, Xiaodong Wang, Mohammad Madhian, “Cross-Layer Design of Wireless Multihop Backhaul Networks With Multiantenna Beamforming”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 06, no. 11, Nov. 2007, pp. 1259-1269.
- [52] Sofie Pollin, Rahul Mangharam, Bruno Bougard, Liesbet Van Der Perre, Ingrid Moerman, Ragunathan Rajkumar, Francky Catthoor, “MEERA : Cross-layer methodology for energy efficient resource allocation in wireless networks”, IEEE transactions on wireless communications, vol. 6, no. 2, 2007, pp. 617-628.
- [53] Ming Ma, Chi Ma, Yuanyuan Yang, “A Cross-Layer Data Gathering Scheme for Heterogeneous Sensor Networks Based on Polling and Load-balancing”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007, pp. 3301 – 3306.
- [54] Jun Ren, Xiaolin Zhang, Yunhui Liu, “Services Driven Cross-Layer Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks”, Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops 2007, vol. 2, pp. 770-775.
- [55] Eleonora Borgia, Marco Conti, Franca Delmastro, “MobileMAN: Design, Integration, and Experimentation of Cross-Layer Mobile Multihop Ad Hoc Networks”, IEEE Communications Magazine, July 2006, pp. 2-8.
- [56] K. Z. Haigh, S. Varadarajan, Choon Yik Tang, “Automatic Learning-based MANET Cross-Layer Parameter Configuration”, IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops 2006, pp. 84-90.
- [57] J. A. Stine, “Cross-Layer Design of MANETs: The Only Option”, Military Communications Conference 2006, pp. 1-7.
- [58] Mieso K. Denko, Elhadi Shakshuki, Haroon Malik, “A Mobility-Aware and Cross-layer Based Middleware for Mobile Ad Hoc Networks”, *Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Networking and Applications 2007*, pp. 474-481.
- [59] P. Baumung, “TrAM: Cross-Layer Efficient Application-Layer Multicast in Mobile Ad-Hoc Networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007, pp. 4069-4073.
- [60] Nan Zhao, Limin Sun, “Research on Cross-Layer Frameworks Design in Wireless Sensor Networks”, Third International Conference on Wireless and Mobile Communications 2007, pp. 50-52.
- [61] Pei-Kai Liao, Min-Kuan Chang, C.-C. Jay, “A Cross-Layer Approach to Contour Nodes Inference with Data Fusion in Wireless Sensor Networks”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007, pp. 2773-2777.
- [62] Yu Cheng, Xinhua Ling, Wei Song, L. X. Cai, Weihua Zhuang, Xuemin Shen, “A Cross-Layer Approach for WLAN Voice Capacity Planning”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 25, issue 4, May 2007, pp. 678-688.
- [63] Ming Li, “Cross-layer Resource Control to Improve TCP Performance over Wireless Network”, 6th IEEE/ACIS

- International Conference on Computer and Information Science 2007, pp. 706-711.
- [64] J.P. Singh, Y. Li, N. Bambos, A. Bahai, B. Xu, G. Zimmermann, "TCP Performance Dynamics and Link-Layer Adaptation Based Optimization Methods for Wireless Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, issue 5, May 2007, pp. 1864-1879.
- [65] Shantidev Mohanty, Ian F. Akyildiz, "A Cross-Layer (Layer 2 + 3) Handoff Management Protocol for Next-Generation Wireless Systems", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 10, Oct. 2006, pp. pp. 1347-1360.
- [66] M. Cao, V. Raghunathan, P.R. Kumar, "Cross-Layer Exploitation of MAC Layer Diversity in Wireless Networks", *14th IEEE International Conference on Network Protocols 2006*, pp. 332-341.
- [67] C.V. Verikoukis, J. Alonso, E. Kartsakli, A. Cateura, L. Alonso, "Cross-Layer Enhancement for WLAN Systems based on a Distributed Queuing MAC protocol", *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference 2006*, vol. 3, pp. 1293-1297.
- [68] Fanglei Sun, V.O.K. Li, Zhifeng Diao, Zhengyuan Xu, "A New Cross-Layer Designed Multipolling Mac Protocol Over WLANs", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007*, pp. 304-309.
- [69] J. Choi, K. Park, C.-k. Kim, "Cross-Layer Analysis of Rate Adaptation, DCF and TCP in Multi-Rate WLANs", *26th IEEE International Conference on Computer Communications 2007*, pp. 1055-1063.
- [70] J. A. Patel, H. Luo, I. Gupta, "A Cross-Layer Architecture to Exploit Multi-Channel Diversity with a Single Transceiver", *IEEE 26th IEEE International Conference on Computer Communications 2007*, pp. 2261-2265.
- [71] S. Singh, F. Ziliotto, U. Madhow, E. M. Belding, M. J. W. Rodwell, "Millimeter Wave WPAN: Cross-Layer Modeling and Multi-Hop Architecture", *IEEE 26th IEEE International Conference on Computer Communications 2007*, pp. 2336-2340.
- [72] J.B. Othman, S. Bouam, B. Diverchy, N. Lauquin, F. Vanden-Abeele, "Facing 802.11 Anomaly and Improving 802.11 WLANs QoS Using a Crosslayer Design Based Unselfish Behavior", *International Conference on Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies 2006*, pp. 143-148.
- [73] June Hwang, Seong-Lyun Kim, "A cross-layer optimization of IEEE 802.11 MAC for wireless multihop networks", *IEEE Communications Letters*, vol. 10, issue 7, July 2006, pp. 531-533.
- [74] G. Athanasiou, T. Korakis, O. Ercetin, L. Tassiulas, "Dynamic Cross-Layer Association in 802.11-Based Mesh Networks", *IEEE 26th IEEE International Conference on Computer Communications 2007*, pp. 2090-2098.
- [75] Jianfeng Wang, M. Venkatachalam, Yuguang Fang, "System Architecture and Cross-Layer Optimization of Video Broadcast over WiMAX", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, issue 4, May 2007, pp. 712-721.
- [76] Lihua Wan, Wenchao Ma, Zihua Guo, "A Cross-layer Packet Scheduling and Subchannel Allocation Scheme in 802.16e OFDMA System", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007*, pp. 1865-1870.
- [77] Guan-Ming Su, Zhu Man, Min Wu, K. J. R. Liu, "Multiuser cross-layer resource allocation for video transmission over wireless networks", *IEEE Network*, vol. 20, issue 2, April 2006, pp. 21- 27.
- [78] N. Moller, A. Arvidsson, J. Petersson, C. Fischione, R. Skog, P. Karlsson, K.H. Johansson, "Supporting End-to-End Applications Over HSDPA by Cross-Layer Signalling", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007*, pp. 3855-3860.
- [79] Saied M. Abd El-atty, "Efficient Packet Scheduling with Pre-defined QoS using Cross-Layer Technique in Wireless Networks", *11th IEEE Symposium on Computers and Communications 2006*, pp. 820-826.
- [80] Saad M. Almajnooni, Bayan S. Sharif, Charalampos C. Tsimenidis, "Queue Priority Based on Cross-Layer Collaboration for Motorway Mobile Ad Hoc Networks", *The Third Advanced International Conference on Telecommunications 2007*, pp. 39-44.
- [81] Thamilarasu, Geethapriya, Mishra, Sumitra and Sridhar, Ramalingam, "A Cross-layer Approach to Detect Jamming Attacks in Wireless Ad Hoc Networks," *Military Communications Conference*, October 2006, pp. 1-7.
- [82] Kaigui Bian, Jung-Min Park, Ruiliang Chen, "Stasis Trap: Cross-Layer Stealthy Attacks in Wireless Ad Hoc Networks", *IEEE Global Telecommunications Conference 2006*, pp. 1-5.
- [83] A. Gumaste, N. Ghani, Si Qing Zheng, "Light-trains: A Cross-Layer Delivery Mechanism for High Bandwidth Applications in Moving Metro-Trains", *IEEE International Conference on Communications 2006*, vol. 6, pp. 2648-2654.