

Oportunidades e Desafios de Pesquisa

Catarina Pereira, *PG53733*, Inês Neves, *PG53864*, e Leonardo Martins, *PG53996*

Resumo

Multiprotocol Label Switching (MPLS) é uma técnica de encaminhamento usada em redes de telecomunicações para direcionar pacotes de dados com base em rótulos em vez de endereços de rede. Ele opera entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI, combinando a velocidade de comutação da camada de enlace de dados com as capacidades de encaminhamento de dados da camada de rede. MPLS oferece vários benefícios, incluindo encaminhamento de pacotes mais rápido, Qualidade de Serviço (QoS) garantida, engenharia de tráfego e recursos de Rede Privada Virtual (VPN). No entanto, também apresenta desafios como conectividade ponto a ponto, custos elevados e suporte limitado para conectividade em nuvem.

Este artigo explora a evolução histórica, a arquitetura e os desafios de pesquisa do MPLS. É discutida a evolução do MPLS desde o seu início no final da década de 1990 até o seu papel atual na otimização do tráfego de rede e no suporte a novos serviços como QoS e VPNs. A arquitetura do MPLS, incluindo seus componentes como Label Switched Paths (LSPs) e Forwarding Equivalence Classes (FECs), é examinada, juntamente com os desafios que enfrenta no gerenciamento, operação, segurança e autocorreção da rede. Além disso, áreas de pesquisa como segurança e privacidade, eficiência energética, redes definidas por software (SDN) e mecanismos de autocorreção são destacadas como áreas-chave para investigação adicional na tecnologia MPLS.

Index Terms

MPLS (Multiprotocol Label Switching), Qualidade de Serviço (QoS), Engenharia de Tráfego, Redes Virtuais Privadas (VPNs), Modo de Transferência Assíncrona (ATM), Label Based Switching (LBS), Differentiated Services (DiffServ)

I. INTRODUÇÃO

ESTE relatório apresenta o trabalho prático realizado na disciplina de Redes de Acesso e Núcleo, do 2º semestre do 1º ano do Mestrado em Engenharia de Telecomunicações e Informática.

No decorrer deste curso, foram abordadas diversas tecnologias presentes nas redes, entre elas o MPLS (Multiprotocol Label Switching), uma técnica de encaminhamento de dados usada em redes de telecomunicações para direcionar dados de um nó para o próximo com base em rótulos em vez de endereços de rede. O principal objetivo do MPLS é simplificar e melhorar o desempenho do fluxo de tráfego da rede.

O MPLS é independente de protocolo, o que significa que pode lidar com vários protocolos de rede, como IP, Ethernet, ATM e Frame Relay. Operando entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI, o MPLS encaminha pacotes com base em protocolos curtos e fixos. Este protocolo combina a velocidade da comutação da camada de ligação de dados com as capacidades de encaminhamento da camada de rede, atribuindo rótulos aos pacotes para permitir um encaminhamento de dados mais rápido e eficiente.

Ao longo deste trabalho, explora-se a evolução histórica, arquitetura e desafios de pesquisa do MPLS, destacando as suas vantagens, desvantagens e o seu papel em redes corporativas e de provedores de serviços.

II. TECNOLOGIAS EM FOCO

Ao longo do curso foram apresentadas diversas tecnologias presentes nas redes como MPLS (Multiprotocol Label Switching) que é uma técnica de encaminhamento usada em redes de telecomunicações para direcionar dados de um nó para o próximo com base em rótulos em vez de endereços de rede. O principal objetivo do MPLS é simplificar e melhorar o desempenho do fluxo de tráfego da rede.

MPLS é independente de protocolo, o que significa que pode lidar com vários protocolos de rede, como IP, Ethernet, ATM e Frame Relay. Este protocolo opera entre as camadas 2 e 3 do modelo OSI, encaminhando pacotes com base em protocolos curtos e fixos. O MPLS combina a velocidade da comutação da camada de ligação de dados com as capacidades de encaminhamento da camada de rede, atribuindo rótulos aos pacotes para permitir um encaminhamento de dados mais rápido e eficiente [1, 2].

Os rótulos identificam caminhos estabelecidos entre terminais, conhecidos como caminhos comutados por rótulos (LSPs), que os routers MPLS usam para tomar decisões de encaminhamento. Isto permite que o MPLS forneça benefícios como [3, 4, 5]:

- Encaminhamento de pacotes mais rápido, evitando pesquisas complexas em tabelas de encaminhamento de dados;

Os estudantes são do 1º ano do Mestrado de Engenharia de Telecomunicações e Informática da Universidade do Minho.

Os endereços de email do Grupo 3 são os seguintes:

Catarina Pereira: pg537336@alunos.uminho.pt.

Inês Neves: pg53864@alunos.uminho.pt.

Leonardo Martins: pg53996@alunos.uminho.pt.

- Largura de banda e qualidade de serviço (QoS) garantidas através da reserva de recursos ao longo do LSP;
- Engenharia de tráfego e balanceamento de carga, definindo caminhos ideais com base em restrições como largura de banda disponível;
- Capacidades de rede privada virtual (VPN) através da criação de partições de rede isoladas logicamente.

As principais vantagens do MPLS em relação a outras tecnologias de comutação incluem:

- **Escalabilidade:** MPLS é altamente escalável, permitindo fácil expansão de redes para centenas de sites.
- **Confiabilidade:** MPLS é uma tecnologia confiável há mais de duas décadas, garantindo desempenho consistente.
- **Qualidade de Serviço (QoS):** MPLS oferece opções de Qualidade de Serviço, aumentando a eficiência de serviços como VoIP.
- **Conexões remotas:** MPLS permite a adição de novas conexões remotas sem a necessidade de hardware extra.
- **Tempo de atividade aprimorado:** MPLS fornece caminhos de rede alternativos, melhorando o tempo de atividade da rede.
- **Encaminhamento de dados de tráfego:** MPLS usa rótulos para pré-determinar caminhos de rede, melhorando a previsibilidade do tráfego.
- **Acordos de Nível de Serviço:** Os serviços MPLS vêm com SLAs, garantindo entrega e outros aspectos do serviço.
- **Largura de banda aprimorada:** MPLS divide o tráfego com eficiência, aumentando a largura de banda da rede.

As principais desvantagens do MPLS em relação a outras tecnologias de comutação incluem:

- **Conectividade ponto a ponto:** MPLS é otimizado para conexões ponto a ponto, o que não é ideal para utilizadores de nuvem.
- **Custo:** os serviços MPLS podem ser caros devido ao alto desempenho e aos SLAs competitivos.
- **Tempo de implantação:** A configuração de circuitos MPLS pode ser demorada, especialmente para novos locais.
- **Suporte limitado:** MPLS não suporta bem a conectividade em nuvem e requer infraestrutura dedicada.

A. *Evolução História do MPLS*

A evolução do MPLS representa um avanço significativo na tecnologia de comutação de redes. Desenvolvido no final da década de 1990, o MPLS surgiu como uma solução para aprimorar a eficiência e o controlo do tráfego de rede, superando as limitações do encaminhamento IP convencional. Ao introduzir um mecanismo baseado em rótulos em vez de endereços IP, o MPLS revolucionou a forma como os pacotes são roteados, permitindo um encaminhamento mais eficiente e flexível. Esta abordagem simplificou o funcionamento dos routers, que passaram a atuar como comutadores, agilizando o processamento de dados [6].

Com o passar do tempo, o MPLS evoluiu para além da simples comutação de rótulos, incorporando o conceito de traffic engineering na gestão de redes. Essa evolução possibilitou o mapeamento preciso dos fluxos de dados na rede, otimizando a utilização e o desempenho dos recursos disponíveis. Além disso, o MPLS viabilizou a implementação de diferentes classes de serviço, como o conceito de DiffServ, permitindo uma gestão mais refinada da largura de banda e a oferta de serviços de qualidade, como suporte de qualidade de serviço (QoS) e redes privadas virtuais (VPN).

- **Surgimento da tecnologia ATM:** A tecnologia ATM (Asynchronous Transfer Mode) surgiu na década de 1990, prometendo dominar o mercado de redes devido às suas altas velocidades.
- **Incompatibilidade com o protocolo IP:** O ATM não era compatível com o protocolo IP, que era o mais utilizado em redes de computadores.
- **Criação da tecnologia LBS:** Para resolver o problema de incompatibilidade, foi criada a tecnologia LBS (Label Based Switching), que buscava aliar o melhor das redes baseadas em pacotes (redes IP) e das redes baseadas em circuitos (ATM).
- **Surgimento do MPLS:** A partir da junção da tecnologia LBS, surgiu o MPLS (Multiprotocol Label Switching) no final da década de 1990.
- **Iniciativas anteriores de protocolos baseados em engenharia de tráfego:** Iniciativas de protocolos baseados em métodos de engenharia de tráfego já utilizavam conceitos semelhantes ao MPLS desde meados da década de 1990.
- **Adoção da tecnologia MPLS:** Com a convergência e fusão desses protocolos sob a proteção do IETF, tanto operadoras quanto fabricantes de equipamentos perceberam o potencial da tecnologia MPLS.
- **Difusão e adoção do MPLS:** Nos anos atuais, o MPLS tem se difundido bastante para a criação de novos serviços, tornando-se uma tecnologia amplamente adotada no mercado.

O MPLS adaptou-se para atender às novas necessidades das redes, desde a melhoria do desempenho e da escalabilidade até a habilitação de novos serviços e arquiteturas. A sua evolução contínua garante a sua relevância no cenário em constante mudança das tecnologias de rede.

B. *Arquitetura MPLS*

Os componentes básicos usados na arquitetura MPLS são rótulo MPLS; Label Exchange, Label Switching Path (LSP), Label Switching Router (LSR) e Forwarding Equivalence Classes (FEC) [7]. Um exemplo de topologia MPLS é mostrado na Figura 1.

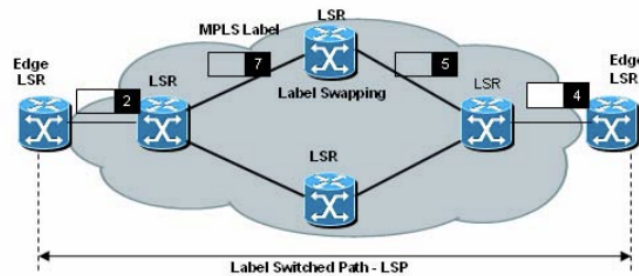


Figura 1: Topologia tradicional do MPLS [7].

A arquitetura MPLS geralmente inclui quatro campos no cabeçalho do rótulo: Label, Exp, S e TTL [8], como ilustrado na Figura 2. O rótulo que está localizado no cabeçalho do pacote encaminhado e carrega informações sobre o pacote ao qual pertence a classe de equivalência de encaminhamento é um valor curto e de comprimento fixo. O MPLS oferece suporte à engenharia de tráfego, permitindo que os administradores de rede definam restrições, como requisitos de largura de banda, e encaminhem os pacotes pelos caminhos ideais para garantir uma melhor qualidade de serviço (QoS) para aplicações sensíveis à latência, como voz e vídeo [3].

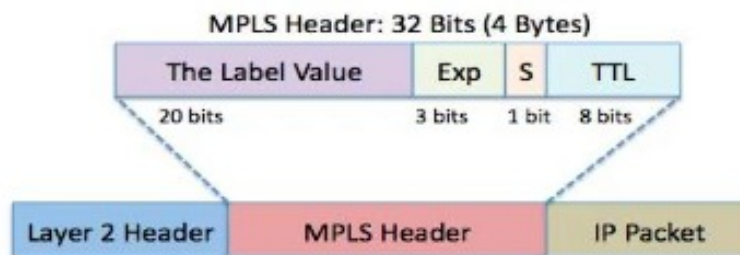


Figura 2: Arquitetura MPLS.

- **Label:** Os 20 bits são definidos como o campo de contagem atual do comutador de rótulo de múltiplos protocolos.
- **Exp:** Classe de Serviço, um campo de 3 bits que afeta o algoritmo de descarte e o algoritmo de enfileiramento que é realizado com cada pacote quando transmitido para a internetwork.
- **S:** O bloco de 1 bit que define e suporta uma pilha de rótulos em modo hierárquico. Um pacote não rotulado é aquele que possui uma pilha de rótulos nula. O pacote mais inferior é considerado rotulado.
- **TTL:** Fornece e possui a funcionalidade tradicional do campo de tempo de vida do IP versão 4. Cada pacote é considerado descartado quando a contagem do campo TTL é reduzida a zero pelos hops intermediários e routers. Com o TTL, o pacote é restrito a fazer loop na rede de forma a evitar o desperdício de recursos úteis. Se um pacote for encontrado contendo um rótulo e estiver a passar por um LSR, então o campo TTL é decrementado em 1.

Os conceitos são essenciais para entender como o MPLS opera e como os pacotes são encaminhados de forma eficiente em redes de grande escala. Analisando brevemente cada um deles:

- **Forwarding Equivalence Classes (FEC):** Durante o nível de transmissão, a FEC é usada para grupos de pacotes que são processados da mesma maneira. Todos os pacotes agrupados neste estilo são roteados para o ponto de destino da mesma maneira. Isto mostra o tráfego previsto tendo o mesmo destino.
- **Label Switch Router (LSR):** LSR é um dispositivo de comutação e encaminhamento de dados de alta velocidade usado para configuração de Label Switched Paths (LSP) em redes MPLS. Os LSPs mencionados acima usam transferência de camada de ligação de dados. Os routers na arquitetura do protocolo MPLS são classificados de acordo com a sua localização, por exemplo, routers de borda de etiqueta e routers de comutação de etiqueta.
- **Label Switched Path (LSP):** Os caminhos configurados para fornecer transmissão de pacotes baseados em FEC antes do início da transferência de dados são denominados Label Switched Paths.
- **Label Distribution Protocol (LDP):** Label Distribution Protocol é um conjunto de LSPs, procedimentos e mensagens. Esses LSPs são configurados na camada datalink. Procedimentos são usados para transportar novas informações para outros LSRs com o uso de informações de encaminhamento de dados da camada de rede. O LDP define sessões síncronas

entre comutadores de rótulos e alterações de rótulos necessárias com o uso de funções de transmissão. LDP é a parte mais importante do componente de controle.

As etiquetas desempenham um papel fundamental na cadeia logística, facilitando o rastreamento e a integração de produtos. Existem diferentes modos de distribuição de etiquetas:

- **Downstream Label Distribution:** Neste modelo, as etiquetas são impressas e aplicadas aos produtos pelo fabricante ou distribuidor antes de serem enviados para o próximo ponto da cadeia de suprimentos. Isso permite que os produtos sejam identificados e rastreados desde a origem até o destino final [7, 9].
- **Downstream-on-Demand Label Distribution:** Neste modelo, as etiquetas são impressas e aplicadas aos produtos apenas quando necessário, geralmente no ponto de recebimento ou distribuição. Isso permite maior flexibilidade e reduz os custos de armazenamento de etiquetas pré-impressas [7, 9].

A relação entre FECs (Field Executable Commands) e etiquetas é que os FECs podem ser usados para controlar remotamente a impressão e aplicação de etiquetas nos pontos de distribuição, permitindo uma distribuição just-in-time das etiquetas [10].

Portanto, as etiquetas podem ser distribuídas de forma centralizada pelo fabricante ou de forma descentralizada e sob demanda nos pontos de distribuição, com o auxílio de tecnologias como FECs para maior eficiência e flexibilidade na cadeia logística [7, 9, 10].

A engenharia de tráfego em redes MPLS é uma técnica importante para otimizar o uso dos recursos de rede e melhorar o desempenho geral. Algumas das principais características e benefícios incluem:

- **Otimização de recursos de rede:** A engenharia de tráfego permite que as redes MPLS utilizem de forma mais eficiente a largura de banda disponível, distribuindo o tráfego com base na demanda e na capacidade da rede [7, 9, 10].
- **Melhoria do desempenho:** Ao direcionar o tráfego pelos caminhos mais adequados, a engenharia de tráfego pode reduzir a latência, a variação de atraso (jitter) e a perda de pacotes, melhorando assim o desempenho geral da rede para aplicações sensíveis a esses fatores, como voz sobre IP e vídeo [11].
- **Garantia de qualidade de serviço (QoS):** A engenharia de tráfego permite que as redes MPLS priorizem e tratem de forma diferenciada os diversos tipos de tráfego, atendendo aos requisitos específicos de cada aplicação [11].
- **Escalabilidade e flexibilidade:** A engenharia de tráfego torna as redes MPLS mais escaláveis, permitindo que elas se adaptem a mudanças na demanda de tráfego e na topologia da rede.
- **Redução de custos:** Ao otimizar o uso dos recursos de rede, a engenharia de tráfego pode levar a uma redução nos custos operacionais e de infraestrutura.

Portanto, a engenharia de tráfego desempenha um papel fundamental na maximização do desempenho, da eficiência e da rentabilidade das redes MPLS, tornando-as uma solução atraente para empresas que buscam melhorar a qualidade e a confiabilidade de seus serviços de rede [7, 9, 10, 11].

As redes de acesso e núcleo estão em evolução contínua e enfrentam diversos desafios, principalmente ligados a requisitos não funcionais. Isso inclui aspectos como Management, Operation, Self-healing, Security, Performance, Reliability, Resilience, Sustainability, entre outros [5, 12, 13, 14, 15]:

- **Management:** Existe uma visão geral da arquitetura de gestão para MPLS, destacando as inter-relações entre os diferentes módulos MIB. A evolução das redes de telecomunicações e os desafios de suporte à comunicação entre diferentes tecnologias, que o MPLS aborda através dos seus métodos de encaminhamento de pacotes. A implementação de redes MPLS, com ênfase específica na Qualidade de Serviço (QoS) e na criação de Redes Privadas Virtuais (VPNs). Por fim, uma perspectiva prática, apresentada a teoria básica do MPLS e ilustrando-a através de uma simulação de rede. Estes pontos ressaltam coletivamente os complexos requisitos de gestão das redes MPLS, que são abordados por meio de diversas estratégias técnicas e operacionais.
- **Operation:** MPLS, uma tecnologia usada em redes modernas de provedores de serviços, enfrenta vários desafios não funcionais. Estes incluem a necessidade de qualidade de serviço no gestão de aplicações de vídeo e voz, a complexidade dos protocolos de sinalização LSP e a exigência de engenharia de tráfego e balanceamento de carga. As características operacionais da tecnologia, como a troca de etiquetas e o uso da tecnologia ATM, também apresentam desafios. Apesar destes desafios, o MPLS oferece a vantagem de ser adaptável a vários meios de transmissão e camadas de rede.
- **Self-healing:** Em caso de falhas na rede, as redes MPLS tradicionais dependem de intervenção manual para restaurar o serviço, o que pode demorar. Uma rede verdadeiramente auto-recuperável é essencial para garantir a sua continuidade .
- **Security:** Com a crescente conectividade, existem desafios significativos para garantir a segurança e a privacidade dos dados transmitidos através de redes de acesso e centrais. É necessária investigação para desenvolver novas técnicas de encriptação, detecção de intrusões e proteção de dados sensíveis.
- **Performance/Reliability/Resilience/Sustainability:** As redes MPLS também devem enfrentar desafios relacionados ao desempenho, confiabilidade, resiliência e sustentabilidade. Isto inclui melhorar a eficiência energética, integrar redes definidas por software (SDN) e virtualização de funções de rede (NFV) e melhorar a capacidade das redes de se recuperarem automaticamente de falhas e ataques.

C. Desafios de Pesquisa

Os desafios de pesquisa do MPLS envolvem acompanhar a evolução da tecnologia, gerir a complexidade da rede, atender às expectativas dos clientes e adaptar-se às mudanças do setor. Os engenheiros de MPLS devem manter-se atualizados sobre os padrões emergentes, como encaminhamento de dados por segmentos e VPN Ethernet, compreender as diversas camadas e protocolos dentro das redes MPLS, garantir a satisfação do cliente cumprindo acordos de nível de serviço e atendendo a requisitos específicos, e estar preparados para se adaptar a novas tecnologias como SDN e NFV, que desafiam as redes MPLS tradicionais. Além disso, implementar as estratégias corretas, manter a experiência e solucionar problemas de redes MPLS de forma eficiente são aspectos cruciais para superar os desafios enfrentados na engenharia MPLS.

- 1) **Segurança e Privacidade:** Com o aumento da conectividade, surgem desafios significativos em garantir a segurança e a privacidade dos dados transmitidos pelas redes de acesso e núcleo. Pesquisas são necessárias para desenvolver novas técnicas de criptografia, detecção de intrusões e proteção de dados sensíveis.
- 2) **Eficiência Energética:** As redes de acesso e núcleo consomem uma quantidade considerável de energia. Pesquisas para desenvolver tecnologias mais eficientes em termos de energia, como encaminhamento de dados inteligente e gestão de energia adaptável, são essenciais para reduzir o impacto ambiental.
- 3) **Redes Definidas por Software (SDN) e Virtualização de Funções de Rede (NFV):** Integrar SDN e NFV nas redes de acesso e núcleo pode melhorar a flexibilidade e a agilidade, mas também apresenta desafios, como garantir a interoperabilidade e a escalabilidade. Pesquisas neste campo podem abordar questões de gestão de recursos, desempenho e confiabilidade.
- 4) **Self-healing e Resiliência:** Com a crescente dependência da conectividade, é crucial que as redes sejam capazes de se recuperar automaticamente de falhas e ataques. Pesquisas em algoritmos de encaminhamento de dados resilientes e mecanismos de detecção de falhas podem melhorar a confiabilidade das redes.

D. Oportunidades de Pesquisa

A pesquisa em MPLS (Multiprotocol Label Switching) oferece uma ampla gama de oportunidades em vários domínios, como redes, telecomunicações, computação em nuvem e muito mais. Aqui estão algumas direções de pesquisa potenciais dentro do MPLS:

- 1) **Otimização de Desempenho:**
 - Investigar métodos para melhorar o desempenho da rede MPLS, incluindo a redução da latência, aumento do throughput e melhoria da Qualidade de Serviço (QoS).
 - Explorar técnicas eficientes de engenharia de tráfego para otimizar a utilização de recursos em redes MPLS.
- 2) **Segurança:**
 - Pesquisar vulnerabilidades de segurança em redes MPLS e desenvolver técnicas para mitigá-las.
 - Estudar métodos para melhorar a segurança do MPLS contra ataques como spoofing, escuta e negação de serviço (DoS).
- 3) **Escalabilidade:**
 - Examinar problemas de escalabilidade em redes MPLS de grande escala e propor arquiteturas e protocolos escaláveis.
 - Investigar técnicas para gerir e dimensionar eficientemente redes MPLS em ambientes de nuvem.
- 4) **Interoperabilidade:**
 - Explorar a interoperabilidade entre MPLS e tecnologias emergentes de rede, como SDN (Software-Defined Networking) e NFV (Network Function Virtualization).
 - Pesquisar métodos para integrar MPLS de forma transparente com redes IPv6 e IoT (Internet of Things).
- 5) **Eficiência Energética:**
 - Investigar estratégias de encaminhamento e comutação energeticamente eficientes em redes MPLS para reduzir o consumo de energia.
 - Explorar alocação de recursos e técnicas de gestão de tráfego conscientes da energia em centros de dados baseados em MPLS.
- 6) **Machine Learning e IA:**
 - Investigar a aplicação de técnicas de Machine Learning e IA para otimizar as operações de rede MPLS, como previsão de tráfego, detecção de anomalias e provisionamento automatizado.
- 7) **5G e Além:**
 - Estudar o papel do MPLS em redes 5G, incluindo segmentação de rede, encadeamento de serviços e computação na borda.
 - Pesquisar melhorias no MPLS para suportar tecnologias emergentes como IoT, comunicação M2M (Machine to Machine) e comunicação ultra confiável com baixa latência (URLLC).
- 8) **Segmentação de Rede:**
 - Explorar técnicas avançadas de segmentação de rede em redes MPLS para alocar eficientemente recursos de rede e suportar requisitos de serviço diversos.

- Investigar mecanismos dinâmicos e adaptativos de segmentação de rede para acomodar demandas de usuário em mudança.

9) **Computação na Borda:**

- Pesquisar a integração do MPLS com arquiteturas de computação na borda, possibilitando serviços de baixa latência e aplicações distribuídas.
- Estudar o impacto do MPLS no desempenho, segurança e escalabilidade da computação na borda.

10) **Multi-Tenancy:**

- Investigar técnicas para suporte eficiente de multi-inquilinos em redes MPLS, especialmente em ambientes de nuvem e centros de dados.
- Pesquisar isolamento de recursos, isolamento de inquilinos e mecanismos de execução de QoS em redes MPLS multi-inquilino.

Estes são apenas pontos de partida; cada um destes tópicos pode ser expandido em inúmeros projetos de pesquisa com objetivos e metodologias específicas.

III. CONCLUSÃO

O MPLS é uma tecnologia fundamental para a construção de redes modernas, oferecendo uma série de benefícios significativos. Ao longo deste trabalho, foram explorados detalhes sobre a evolução histórica, a arquitetura, os desafios e as oportunidades de pesquisa, bem como os principais benefícios proporcionados pelo MPLS.

Ao longo deste curso, explora-se o MPLS (Multiprotocol Label Switching) e a sua evolução histórica, arquitetura, vantagens, desvantagens e desafios de pesquisa.

O MPLS surgiu como uma solução revolucionária para melhorar o desempenho e a eficiência do encaminhamento de dados em redes de telecomunicações. A sua capacidade de simplificar o encaminhamento de pacotes usando rótulos, independentemente do protocolo de rede, proporcionou uma série de benefícios, como encaminhamento mais rápido, garantia de qualidade de serviço e capacidades de VPN.

A evolução do MPLS ao longo do tempo trouxe melhorias significativas, como a incorporação de técnicas de engenharia de tráfego, que permitem a otimização dos recursos de rede e a melhoria do desempenho. Além disso, o MPLS enfrentou desafios constantes, como garantir a segurança e a privacidade dos dados, melhorar a eficiência energética e integrar tecnologias emergentes, como SDN e NFV.

A arquitetura do MPLS inclui componentes essenciais, como rótulos MPLS, caminhos comutados por rótulos (LSPs) e routers de comutação de etiquetas (LSRs), que trabalham juntos para encaminhar eficientemente o tráfego de rede. A engenharia de tráfego desempenha um papel crucial na otimização do uso dos recursos e na melhoria da qualidade de serviço.

No entanto, o MPLS também apresenta desafios, como a necessidade de garantir a segurança e a privacidade dos dados, melhorar a eficiência energética e integrar tecnologias emergentes, como SDN e NFV. A pesquisa nesses domínios é essencial para superar esses desafios e manter o MPLS relevante em um cenário de rede em constante evolução.

Em conclusão, o MPLS continua a ser uma tecnologia fundamental para redes de telecomunicações, oferecendo uma combinação única de desempenho, flexibilidade e confiabilidade. No entanto, é necessário um esforço contínuo de pesquisa e desenvolvimento para enfrentar os desafios emergentes e garantir que o MPLS continue a atender às demandas das redes modernas.

RECONHECIMENTO

Os autores desejam expressar a sua sincera gratidão ao Professor Doutor Flávio Oliveira Silva pela orientação e ajuda. O professor não só respondeu a todas as perguntas e esclareceu todas as dúvidas relacionadas ao trabalho prático, mas também forneceu orientação sobre o enunciado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Swati Srivastava e Juginder Pal Singh. «Efficiency of Multi-Protocol LABEL Switching over Traditional Switching». Em: *2021 5th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)*. 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ISCON52037.2021.9702352.
- [2] Deep Medhi e Karthik Ramasamy. «MultiProtocol Label Switching (MPLS)». Em: Elsevier, 2018, pp. 734–764. DOI: 10.1016/B978-0-12-800737-2.00026-0.
- [3] G. Armitage. «MPLS: the magic behind the myths [multiprotocol label switching]». Em: *IEEE Communications Magazine* 38.1 (2000), pp. 124–131. DOI: 10.1109/35.815462.
- [4] Loa Andersson e Stewart Bryant. «The IETF Multiprotocol Label Switching Standard: The MPLS Transport Profile Case». Em: *IEEE Internet Computing* 12.4 (2008), pp. 69–73. DOI: 10.1109/MIC.2008.89.
- [5] M REED. «Multiprotocol Label Switching». Em: Elsevier, 2008, pp. 377–402. DOI: 10.1016/B978-0-240-80748-5.50020-5.

- [6] Rolf Winter. «The coming of age of MPLS». Em: *IEEE Communications Magazine* 49.4 (2011), pp. 78–81. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5741150.
- [7] C. Taskin et al. «Evolution of the Current Telecommunications Networks and the Next Generation Optical Networks». Em: *International Conference on Internet Surveillance and Protection (ICISP'06)*. 2006, pp. 12–12. DOI: 10.1109/ICISP.2006.11.
- [8] Iflah Aijaz e Sheikh Idrees. «Performance Evaluation of Multi-protocol Label Switching-Traffic Engineering Schemes». Em: *ICST Transactions on Mobile Communications and Applications* 6 (19 jul. de 2021), p. 166550. DOI: 10.4108/eai.8-10-2020.166550.
- [9] F. Le Faucheur. «IETF Multiprotocol Label Switching (MPLS) Architecture». Em: *1998 1st IEEE International Conference on ATM. ICATM'98*. 1998, pp. 6–15. DOI: 10.1109/ICATM.1998.688153.
- [10] A. Viswanathan et al. «Evolution of multiprotocol label switching». Em: *IEEE Communications Magazine* 36.5 (1998), pp. 165–173. DOI: 10.1109/35.668287.
- [11] Obiekwe Obinna Kingsley. «MEE08:33 Optimizing Application Traffic on MPLS-Enabled Network Links». Em: (2008).
- [12] T. Nadeau, C. Srinivasan e A. Farrel. *Multiprotocol Label Switching (MPLS) Management Overview*. Nov. de 2005. DOI: 10.17487/rfc4221.
- [13] Fabiano Couto Corrêa da Silva. *MPLS (Multi Protocol Label Switch) para redes PTN*. Set. de 2013.
- [14] Junior Cesar Caetano. *Implementação de topologia de redes utilizando MPLS*. Set. de 2013.
- [15] Mauricio De Freitas. *Projeto e simulação de rede MPLS*. Dez. de 2013.



Catarina Pereira atualmente é aluna do primeiro ano do curso de Mestrado de Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho, iniciando a sua formação em licenciatura no mesmo curso no ano letivo de 2020/2021. Além dos estudos, foi diretora do Departamento de Saídas Profissionais do NETIUM (Núcleo de Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho) para o ano de 2023, tendo atuado como colaboradora do Departamento Pedagógico no ano anterior. Em 2022, ela participou de um projeto de handebol em parceria com o ABC, exercendo o papel de analista do projeto. Catarina também tem experiência em outras áreas, incluindo participação num festival internacional de dança, conclusão de um curso de Língua Gestual Portuguesa, uma residência artística, conclusão do ensino secundário com ênfase em Ciências e Tecnologias, curso de inglês e aulas de música e ballet.



Inês Neves atualmente é aluna do primeiro ano do curso de Mestrado Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho, iniciando a sua formação em licenciatura no mesmo curso no ano letivo de 2020/2021. Além dos estudos, ela atuou como vice-diretora da Assembleia Geral do NETIUM (Núcleo de Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho) para o ano de 2023, tendo atuado anteriormente como colaboradora do Departamento Pedagógico e do Departamento de Comunicação e Imagem em anos anteriores, em 2021 e em 2022, respetivamente. Em 2022, ela participou num projeto de handebol em parceria com o ABC, exercendo o papel de analista do projeto. Inês também tem experiência em outras áreas, incluindo a conclusão de um curso de inglês na Royal School of Languages, a prática de natação por muitos anos, bem como ter obtido certificado em ballet. Ela também concluiu o ensino secundário com ênfase em Ciências e Tecnologias.



Leonardo Martins é um estudante do primeiro ano do curso de Mestrado de Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho, tendo iniciado a sua formação em licenciatura no mesmo curso no ano letivo de 2020/2021. Além dos estudos, ele realizou atividades no vice-diretor do Conselho Fiscal do NETIUM (Núcleo de Engenharia de Telecomunicações e Informática na Universidade do Minho) para o ano de 2023, tendo atuado como colaborador do Departamento de Comunicação e Imagem no ano anterior. Em 2022, ele participou de um projeto de handebol em parceria com o ABC, exercendo o papel de *developer* do projeto. Leonardo também tem experiência em outras áreas e conclusão do ensino secundário com ênfase em Ciências e Tecnologias.