



Agregação Dinâmica de Enlaces e Redistribuição de Fluxos em Redes SDN Híbridas

William L. Reiznautt¹ , Nelson L. S. da Fonseca¹ 

¹Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
13.083-852 – Campinas – SP – Brasil

{william,nfonseca}@ic.unicamp.br

Abstract. *This work proposes an innovative solution for dynamic link aggregation and adaptive traffic redistribution in hybrid SDN networks, named H-DLAFR (Hybrid Dynamic Link Aggregation and Flow Redistribution). The proposed model integrates SDN control mechanisms with traditional protocols, enabling automatic interface identification, dynamic link group formation, and real-time flow migration. Additionally, the H-LARP (Hybrid Load-Adaptive Redistribution Policy) is presented, responsible for adaptive flow redistribution and link self-recovery through automated RARP packet generation.*

Resumo. *Este trabalho propõe uma solução inovadora para agregação dinâmica de enlaces e redistribuição adaptativa de tráfego em redes SDN híbridas, denominada H-DLAFR (Hybrid Dynamic Link Aggregation and Flow Redistribution). A proposta integra mecanismos de controle SDN e protocolos tradicionais, permitindo a identificação automática de interfaces, a formação dinâmica de grupos de agregação e a migração de fluxos em tempo real. Complementarmente, introduz-se a política H-LARP (Hybrid Load-Adaptive Redistribution Policy), responsável pela redistribuição inteligente de fluxos e pela autorecuperação de enlaces mediante a geração automatizada de pacotes RARP.*

1. Introdução

As Redes Definidas por Software (SDN) possibilita um controle e gerenciamento de redes mais efetivo, devido a separação do plano de controle e plano de dados, que permite a programação centralizada de políticas de encaminhamento e o uso de controladores capazes de reagir dinamicamente às condições da rede em diversos equipamentos. Com isso, é possível criar soluções de automação e orquestração mais flexíveis, capazes de se adaptar, em tempo real, a variações de tráfego e falhas de enlace. Apesar das vantagens, a adoção integral de SDN em ambientes reais é limitada pela presença de equipamentos legados que não oferecem suporte à programabilidade e nem à atualização de *firmware*. A substituição completa da infraestrutura tradicional por dispositivos SDN é frequentemente inviável, tanto por restrições orçamentárias quanto por dependências operacionais. Nesse contexto, as redes SDN híbridas emergem como alternativa viável, combinando a flexibilidade da programabilidade SDN com a estabilidade das redes convencionais.

A integração entre esses dois paradigmas impõe desafios, principalmente no tratamento de agregação de enlaces e redistribuição de fluxos. Protocolos tradicionais, como

o LACP (*Link Aggregation Control Protocol*), não exploram o potencial de controle centralizado e operam de forma estática, limitando o balanceamento de carga e a recuperação e falhas. Por outro lado, soluções SDN puras não oferecem compatibilidade direta com *switches* convencionais, dificultando sua aplicação em ambientes híbridos.

Diante dessas limitações, este trabalho propõe uma abordagem para agregação dinâmica de enlaces e redistribuição adaptativa de tráfego em redes SDN híbridas, denominada **H-DLAFR** (*Hybrid Dynamic Link Aggregation and Flow Redistribution*). A proposta combina os benefícios do controle SDN com os mecanismos tradicionais de agregação, permitindo a identificação automática de interfaces, a autoconfiguração de grupos de enlaces e a migração dinâmica de fluxos em caso de falhas. Além disso, introduz-se a política **H-LARP** (*Hybrid Load-Adaptive Redistribution Policy*), que implementa a redistribuição de tráfego baseada em métricas de utilização e no envio automatizado de pacotes RARP. As soluções foram implementadas e avaliadas em ambientes reais e emulados, demonstrando ganhos expressivos em desempenho, flexibilidade e resiliência. Os resultados comprovam que a integração entre planos de controle SDN e tradicional pode otimizar a utilização de enlaces e reduzir significativamente o tempo de recuperação de falhas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve os fundamentos e trabalhos relacionados sobre gerenciamento e agregação de enlaces em redes tradicionais, SDN e híbridas; a Seção 3 introduz o H-DLAFR e a política H-LARP; a Seção 4 apresenta as limitações da solução e alternativas futuras; a Seção 5 detalha o ambiente experimental e a análise dos resultados obtidos; e, por fim, a Seção 6 discute as conclusões e perspectivas futuras deste trabalho.

2. Trabalhos Relacionados e Fundamentação Teórica

Diversas pesquisas abordam o gerenciamento e a integração de redes tradicionais e SDN, propondo soluções para controle, automação e desempenho [Amin et al. 2018]. As redes tradicionais, embora estáveis e amplamente difundidas, operam com controle descentralizado, no qual cada *switch* ou roteador toma decisões de encaminhamento de forma autônoma com base em tabelas locais e protocolos distribuídos. Essa abordagem, apesar de robusta, limita a visibilidade e a capacidade de intervenção global do administrador.

O gerenciamento de redes tradicionais é frequentemente baseado em protocolos como o SNMP (*Simple Network Management Protocol*) e o NetFlow, utilizados para coleta de métricas e análise de tráfego [Stallings 1998, Weiwei et al. 2011]. O SNMP fornece informações sobre o desempenho e o estado dos dispositivos, enquanto o NetFlow permite observar padrões de comunicação, como endereços de origem e destino e volume de dados. Embora úteis, essas soluções apresentam caráter reativo e não intervêm diretamente na operação da rede, exigindo configuração e análise manual. Essa limitação motivou o desenvolvimento de arquiteturas mais programáveis, nas quais o gerenciamento é automatizado e orientado por políticas. Nesse contexto, as Redes Definidas por Software (SDN) surgem como uma alternativa moderna, ao introduzir a separação entre os planos de controle e de dados. O controle centralizado, implementado em software, permite programar o comportamento da rede de maneira dinâmica e independente do fabricante dos equipamentos, por meio do protocolo *OpenFlow* [McKeown et al. 2008]. Essa arquitetura amplia as possibilidades de automação, reconfiguração e análise em tempo real, faci-

litando a criação de políticas adaptativas e mecanismos de reação a falhas. Apesar de seus avanços, a adoção completa de SDN ainda enfrenta desafios em ambientes corporativos e acadêmicos, especialmente pela presença de dispositivos legados. Dessa forma, surgem as redes SDN híbridas, que combinam a programabilidade do SDN com a estabilidade das redes tradicionais [Amin et al. 2018]. Nelas, equipamentos SDN são posicionados em pontos estratégicos, permitindo controlar indiretamente dispositivos legados e coletar métricas sobre o comportamento global da rede.

Entre os trabalhos voltados para redes híbridas, destaca-se a proposta de autoconfiguração de políticas de controle de acesso (ACLs) apresentada em [Amin et al. 2016], que utiliza análise baseada em grafos para aplicar políticas automaticamente por meio de equipamentos SDN. Em trabalhos mais recentes, essa linha de pesquisa evoluiu para o uso de técnicas de aprendizado por reforço, permitindo a otimização do posicionamento e da aplicação de políticas de ACL de forma adaptativa em redes SDN híbridas [Khan et al. 2025]. Outro estudo relevante é apresentado em [Huang et al. 2021], que propõe um mecanismo de controle inteligente de tráfego para otimização de Qualidade de Serviço (QoS) em redes SDN híbridas. O trabalho utiliza técnicas de aprendizado por reforço profundo para realizar a divisão de fluxos e o ajuste dinâmico de rotas, considerando métricas como atraso, jitter e utilização dos enlaces. Apesar de seus resultados positivos, a proposta se limita à engenharia de tráfego em nível de rotas e não aborda a agregação de enlaces. Nesse sentido, não foram identificados, até o momento, trabalhos na literatura que tratem explicitamente da agregação dinâmica de enlaces em redes SDN híbridas.

A agregação de enlaces, definida pelo padrão IEEE 802.1AX-2020 [IEEE 2020], é amplamente utilizada em redes tradicionais por meio do protocolo LACP (*Link Aggregation Control Protocol*). O LACP permite combinar múltiplos enlaces físicos em um único enlace lógico (*Link Aggregation Group* – LAG), aumentando a largura de banda e a redundância. No entanto, o protocolo impõe restrições importantes, como a necessidade de que todos os enlaces possuam a mesma velocidade e o mesmo modo de operação, além de depender de configuração manual e balanceamento estático de tráfego. Em contraste, as soluções propostas na literatura para agregação dinâmica de enlaces em redes puramente SDN exploram a capacidade do controlador de programar, em tempo real, regras de balanceamento e políticas de distribuição de tráfego [Junior et al. 2018]. Dessa forma, torna-se possível ajustar dinamicamente as rotas e realocar fluxos entre os enlaces agregados com base em métricas de desempenho extraídas do plano de controle. Embora esses trabalhos evidenciem ganhos expressivos, todos assumem que a agregação e o gerenciamento dos enlaces ocorrem exclusivamente entre dispositivos SDN, condição necessária para garantir visibilidade completa e controle integral do LAG pelo controlador. Essa dependência restringe tais soluções a cenários estritamente SDN e inviabiliza sua aplicação direta em ambientes híbridos, nos quais equipamentos tradicionais coexistem com dispositivos SDN.

Nesse contexto, evidencia-se a lacuna que motivou este trabalho: a inexistência de uma solução que combine a programabilidade do SDN com a compatibilidade de *switches* tradicionais para permitir agregação dinâmica e redistribuição adaptativa de fluxos em redes híbridas. O modelo proposto neste artigo, denominado **H-DLA FR** (*Hybrid Dynamic Link Aggregation and Flow Redistribution*), foi desenvolvido justamente para

preencher essa lacuna, oferecendo uma abordagem compatível, automatizada e resiliente para a agregação de enlaces em redes SDN híbridas.

3. Uma Solução para Agregação Dinâmica de Enlaces

Esta seção propõe um modelo para agregação dinâmica de enlaces em redes SDN híbridas, composto pela solução **H-DLAFR** (*Hybrid Dynamic Link Aggregation and Flow Redistribution*) e pela política de redistribuição adaptativa **H-LARP** (*Hybrid Load-Adaptive Redistribution Policy*). O objetivo central é permitir que o plano de controle SDN gerencie enlaces agregados envolvendo equipamentos tradicionais, sem necessidade de configurações locais ou suporte nativo a SDN.

3.1. Definição Geral da Solução H-DLAFR

A H-DLAFR integra as capacidades de programabilidade da SDN com o funcionamento de *switches* tradicionais, viabilizando a criação e o controle dinâmico de grupos de agregação (*Link Aggregation Groups* – LAG) em ambientes híbridos. A solução opera exclusivamente a partir do *switch* SDN e do controlador, permitindo a detecção automática de múltiplos enlaces entre equipamentos, a criação dinâmica de grupos de agregação e o redirecionamento adaptativo de fluxos conforme a demanda de tráfego. Adicionalmente, o modelo é capaz de reagir automaticamente a variações de carga e a falhas de enlace, sem necessidade de intervenção humana. Toda a lógica de controle permanece concentrada no plano SDN, enquanto os equipamentos tradicionais permanecem inalterados.

3.2. Manipulação do Encaminhamento no *Switch* Tradicional

Um desafio central em ambientes híbridos consiste na impossibilidade de configurar diretamente o *switch* tradicional. Para superar essa limitação, este trabalho adaptou uma técnica utilizada em ambientes de virtualização durante *live migrations*. O método consiste no envio de quadros RARP estrategicamente construídos, capazes de atualizar a tabela FDB do *switch* tradicional e redirecionar fluxos para uma porta desejada. Assim, ao alterar um fluxo no *switch* SDN, o controlador envia um pacote RARP pela porta correspondente, informando ao *switch* tradicional que o endereço MAC de origem passou a estar associado a um novo enlace. Esse mecanismo possibilita a redistribuição dinâmica de fluxos sem qualquer modificação de *firmware* ou configuração adicional nos dispositivos legados.

3.3. Componentes de Controle

A H-DLAFR organiza sua operação em três módulos complementares:

Módulo de agregação: identifica portas candidatas, valida enlaces com caminho comum e cria ou expande LAGs automaticamente, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 2.

Módulo de fluxo: monitora estatísticas e realoca fluxos, atualizando regras OpenFlow e enviando mensagens RARP para modificar a FDB do *switch* tradicional, conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.

Módulo de falhas: verifica periodicamente a integridade dos enlaces, detecta falhas e redireciona fluxos para manter a conectividade, conforme o fluxograma mostrado na Figura 4.

A interação entre esses módulos garante uma operação contínua e coerente, permitindo que enlaces sejam adicionados, removidos ou reorganizados de forma transparente, conforme o fluxo de execução ilustrado na Figura 1.

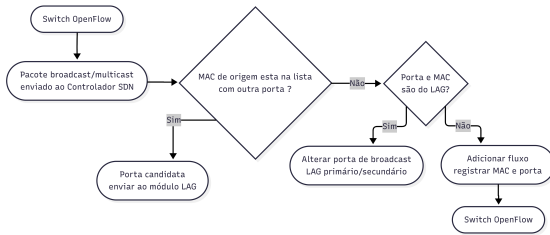


Figura 1. Adaptação do código *simple_switch* OpenFlow do Ryu.

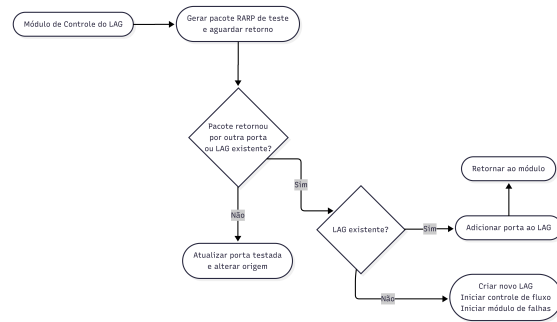


Figura 2. Módulo de controle de criação e adição de portas no LAG.

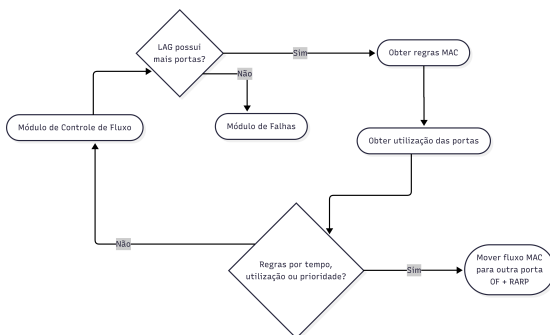


Figura 3. Módulo de controle dos fluxos sobre o LAG.

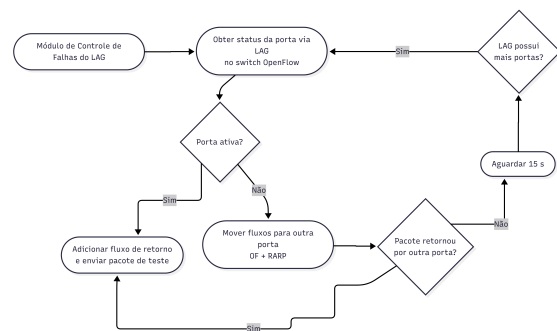


Figura 4. Módulo de controle de falhas do LAG.

3.4. Prevenção de Loops e Detecção de Enlaces Candidatos

A identificação de portas aptas à agregação é realizada observando o recebimento de quadros *broadcast* ou *multicast* em portas distintas associadas ao mesmo endereço MAC. Quando isso ocorre, a solução executa um teste ativo com quadros controlados para verificar se há um caminho comum entre as portas, validando assim a formação do LAG.

A presença de múltiplos enlaces paralelos pode provocar *loops* em tráfego de difusão. Para evitá-los, a solução adota um mecanismo de hierarquia entre portas: a cada intervalo de tempo, apenas uma porta do LAG opera como mestre para quadros *broadcast* ou *multicast*, enquanto as demais descartam tais quadros, prevenindo redundâncias.

3.5. Política H-LARP: Redistribuição Adaptativa

A solução é complementada pela política **H-LARP**, responsável por implementar a redistribuição inteligente de fluxos entre os enlaces do LAG. A política opera em intervalos de cinco segundos e baseia suas decisões na coleta de estatísticas OpenFlow de bytes e pacotes, na análise da utilização média dos enlaces e na identificação de enlaces sobrecarregados, quando a ocupação atinge valores iguais ou superiores a 80%, bem como de enlaces subutilizados, cuja utilização permanece igual ou inferior a 30%. Sempre que um desequilíbrio é detectado, fluxos candidatos são realocados para enlaces menos utilizados. A migração é realizada por meio da atualização simultânea das regras OpenFlow no *switch* SDN e da tabela FDB do *switch* tradicional, utilizando o envio de quadros RARP

para refletir a nova associação de porta. Esse processo ocorre de forma transparente para a rede, sem causar interrupções perceptíveis no tráfego.

A H-LARP também viabiliza a definição de políticas avançadas, como a priorização de fluxos críticos, a alocação diferenciada por classe de serviço, a adaptação a padrões dinâmicos de tráfego e o suporte a estratégias de balanceamento orientadas por requisitos de Qualidade de Serviço (QoS).

3.6. Discussão e Aplicabilidade

O modelo proposto demonstra que é possível aplicar a programabilidade da SDN a ambientes compostos por dispositivos heterogêneos, viabilizando a agregação de enlaces sem o uso do LACP, o controle dinâmico e centralizado da utilização de banda e a redistribuição adaptativa de fluxos em função de carga, falhas ou prioridades. Essa abordagem permite operação transparente sobre equipamentos tradicionais, sem exigir modificações de configuração ou *firmware*.

A H-DLAFR atua no nível inter-fluxo, adequando-se a cenários em que o custo operacional de atualizações frequentes é aceitável. Em ambientes com grande quantidade de fluxos, o controlador deve estar topologicamente próximo ao *switch* SDN para manter baixa latência nas operações de controle. Ao combinar agregação automática, manipulação indireta da FDB e redistribuição adaptativa, o modelo alcança benefícios semelhantes aos de uma rede SDN pura, porém sem exigir substituição dos equipamentos existentes. Essa abordagem torna viável a modernização progressiva da infraestrutura, maximizando desempenho, resiliência e eficiência operacional em redes híbridas.

A inovação central da H-DLAFR está na manipulação indireta da tabela FDB de equipamentos tradicionais usando pacotes RARP enviados pelo controlador SDN, técnica inspirada em *live migration* de máquinas virtuais, como é apresentado na Figura 5 a topologia da migração e na Figura 6 o pacote que foi criado pelo sistema de virtualização com o endereço MAC da VM. Com isso, o switch tradicional atualiza automaticamente a porta de encaminhamento dos fluxos sem necessidade de configuração local.

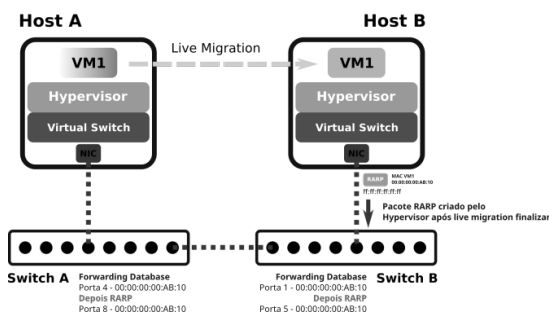


Figura 5. Elementos envolvidos no (*live migration*).

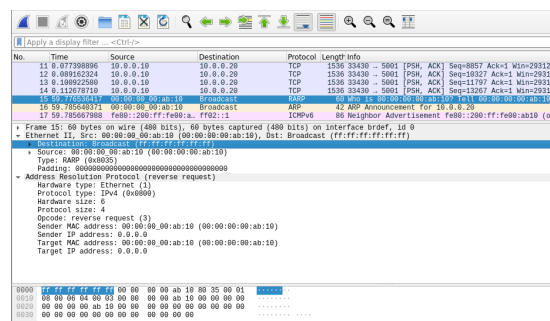


Figura 6. Pacote RARP criado pelo virtualizador.

A H-DLAFR também incorpora mecanismos adicionais para aprimorar a robustez e a eficiência da agregação de enlaces. Entre esses mecanismos estão a identificação automática de enlaces elegíveis à agregação, realizada a partir da detecção de quadros recebidos por múltiplas portas fora de um grupo previamente configurado, a prevenção de *loops* por meio de uma hierarquia primário-secundário entre as portas agregadas, com

ajuste dinâmico do encaminhamento de tráfego de difusão, e o monitoramento periódico de falhas baseado no envio de pacotes de teste em modo *broadcast* e na verificação do retorno desses pacotes por todas as portas do grupo. Adicionalmente, a solução realiza balanceamento dinâmico e priorização de tráfego, permitindo a seleção adaptativa da porta mais adequada para a alocação de novos fluxos conforme o perfil do tráfego.

4. Limitações Estruturais do Modelo Híbrido e Comportamento dos Fluxos

Esta seção discute limitações inerentes ao ambiente híbrido composto por um *switch* SDN e um *switch* tradicional. Tais limitações resultam do funcionamento padrão da Tabela de Encaminhamento por MAC (*FDB*) nos *switches* tradicionais e influenciam diretamente o comportamento dos fluxos avaliados posteriormente. O objetivo é esclarecer restrições estruturais que motivaram determinadas escolhas no modelo e que moldam os resultados apresentados na Seção 5.

4.1. Encaminhamento L2 no Switch Tradicional

No *switch* tradicional, o encaminhamento é determinado unicamente pelo endereço MAC de destino aprendido na *FDB*. Assim, quando múltiplos fluxos são destinados ao mesmo *host* no lado SDN, todos são necessariamente encaminhados pela mesma porta, como ilustrado na Figura 7. Esse comportamento é uma limitação estrutural da camada 2: um único MAC de destino pode estar associado a apenas uma porta em um dado instante.

Consequentemente, embora a aplicação SDN possa alocar fluxos distintos em diferentes enlaces, qualquer fluxo cujo destino seja um MAC específico no lado SDN será invariavelmente entregue através da porta registrada pelo *switch* tradicional.

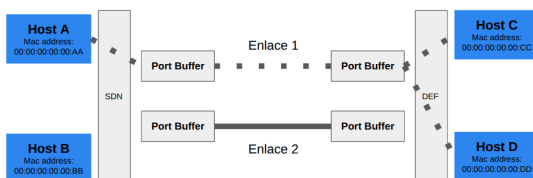


Figura 7. Fluxo entre A e C e entre A e D.

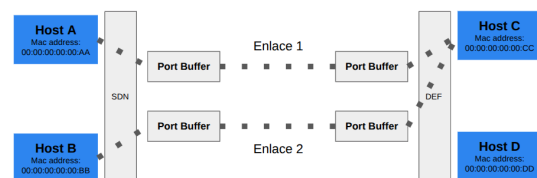


Figura 8. Fluxo entre C e A e entre C e B.

4.2. Flexibilidade no Lado SDN

No lado SDN, a granularidade de decisão é mais rica, permitindo combinar *source MAC* e *destination MAC* nas regras *OpenFlow*. A Figura 8 ilustra que fluxos originados de um mesmo *host* podem ser distribuídos entre diferentes enlaces conforme os critérios da aplicação. Para compatibilizar a operação híbrida, a solução incluiu uma adaptação na aplicação SDN para realizar correspondência por pares (origem, destino), permitindo que fluxos distintos direcionados ao mesmo *switch* tradicional sejam alocados de forma coerente com as restrições do lado legado.

4.3. Atualização da FDB e Movimentação de Fluxos

A realocação de fluxos exige sincronização entre as tabelas *OpenFlow* e a *FDB*. O modelo realiza essa sincronização enviando pacotes RARP ao *switch* tradicional, atualizando o MAC de saída associado à porta apropriada, conforme o mecanismo descrito na

Seção 3.2. A Figura 5 demonstra como um fluxo pode ser movido entre enlaces por meio dessa técnica. Esse mecanismo, embora eficiente, é inerentemente limitado pela própria semântica do L2 tradicional: apenas fluxos destinados a MACs distintos podem ser completamente separados entre múltiplos enlaces sem impactar outros fluxos associados ao mesmo destino.

4.4. Limitações Relacionadas ao Intra-Fluxo

A solução proposta não permite dividir pacotes de um mesmo fluxo entre múltiplos enlaces, característica presente em abordagens puras SDN baseadas em *intra-flow striping*. Como o *switch* tradicional associa cada MAC de destino a uma única porta, o tráfego intra-fluxo permanece limitado a um único enlace físico. Tentativas de replicar mecanismos como os propostos em [Junior et al. 2018] são inviáveis sem modificações no *switch* tradicional. Em contrapartida, estratégias de *inter-flux balancing* são plenamente suportadas. A solução alterna fluxos ao longo do tempo, explorando múltiplos enlaces sem violar o comportamento esperado da *FDB*. Esse mecanismo é utilizado pela política H-LARP e é decisivo para os ganhos observados na Seção 5.

4.5. Possível Reescrita de Endereços MAC e Trabalhos Futuros

Uma possível evolução do modelo seria realizar reescrita dos endereços MAC dos *hosts* do lado SDN. Com isso, fluxos destinados ao mesmo *host* poderiam ser distribuídos entre múltiplas portas no *switch* tradicional, superando a restrição imposta pela *FDB*. Essa abordagem permitiria estratégias mais sofisticadas de balanceamento, incluindo alocação dinâmica por fluxo com granularidade fina. Contudo, tais funcionalidades extrapolam o escopo deste trabalho, uma vez que exigem operações adicionais de modificação de quadros, maior complexidade operacional e impacto no plano de dados. Assim, foram identificadas como uma direção interessante para trabalhos futuros.

4.6. Considerações Sobre o Balanceamento em Ambiente Híbrido

Em soluções puramente SDN, o balanceamento pode empregar funções de *hash* sobre múltiplos campos L2/L3/L4 ou até mesmo alternância de pacotes (*intra-flow*). No ambiente híbrido avaliado, o modelo adotado é condicionado pelas restrições impostas pela tabela *FDB* do *switch* tradicional e pelas regras de encaminhamento SDN baseadas em pares de endereços de origem e destino. A sincronização entre enlaces é realizada por meio do envio de mensagens RARP, enquanto a redistribuição ocorre no nível inter-fluxo, em intervalos definidos pela política H-LARP.

Apesar dessas restrições, a solução permite priorização de fluxos, isolamento de tráfego em enlaces específicos e movimentação dinâmica de fluxos entre enlaces sempre que necessário, maximizando a disponibilidade agregada. A Seção 5 apresenta a avaliação experimental que demonstra o impacto dessas limitações e o potencial de otimização oferecido pela SDN mesmo em ambientes compostos por equipamentos tradicionais.

5. Avaliação Experimental e Resultados

Esta seção apresenta a avaliação experimental das soluções H-DLAFR e H-LARP em diferentes cenários, comparando-as com modelos tradicionais de agregação de enlaces, especialmente o LACP. O objetivo é validar a viabilidade do modelo em ambiente híbrido SDN e demonstrar os benefícios do controle centralizado de fluxos em equipamentos tradicionais.

5.1. Ambiente Experimental e Topologia

Os experimentos foram realizados em uma combinação de ambiente virtualizado e equipamentos físicos reais. A topologia utilizada é apresentada na Figura 9. O ambiente é composto por:

- um *switch* tradicional Dell EMC N1148T-ON, firmware 6.4.2.8;
- um *switch* SDN implementado em *OpenvSwitch* com suporte a OpenFlow 1.3;
- dois servidores físicos interligando o *switch* tradicional e o ambiente SDN;
- enlaces físicos de 1 Gbps e 10 Gbps, dependendo do cenário;
- múltiplos *hosts* clientes gerados via *network namespaces* e conectados através de pares *veth*.

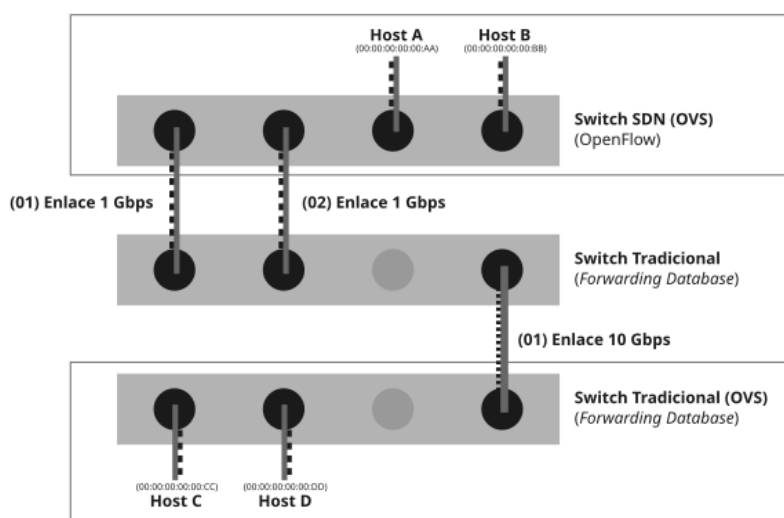


Figura 9. Topologia híbrido para validação do H-DLAFR.

Para representar clientes independentes, cada *namespace* cria uma pilha completa de rede. As interfaces virtuais foram limitadas a 1 Gbps e 70 ms de latência via `tc`, como:

```
tc qdisc add dev vethX root tbf rate 1Gbit burst 1Gbit latency 70ms
```

A Figura 10 apresenta o arranjo físico utilizado nos experimentos reais, incluindo enlaces agregados entre servidores e o *switch* tradicional.

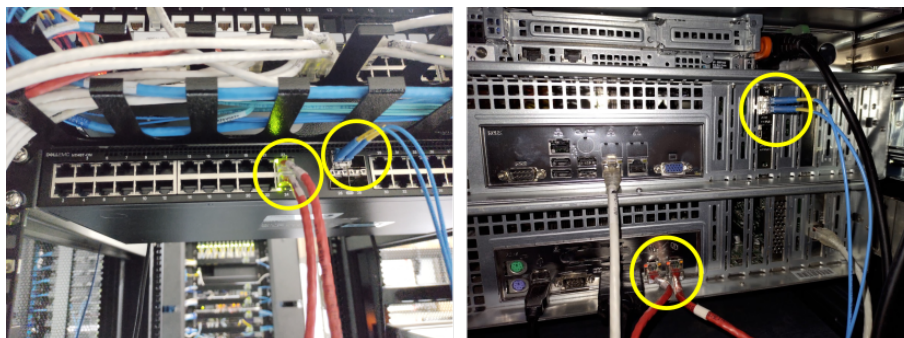


Figura 10. Montagem experimental dos equipamentos físicos utilizados na validação.

5.2. Fluxos Utilizados na Validação

Foram definidos cinco fluxos concorrentes, combinando perfis de tráfego elefante e rato, utilizando *iperf*. Os fluxos, ilustrados na Figura 11, incluem:

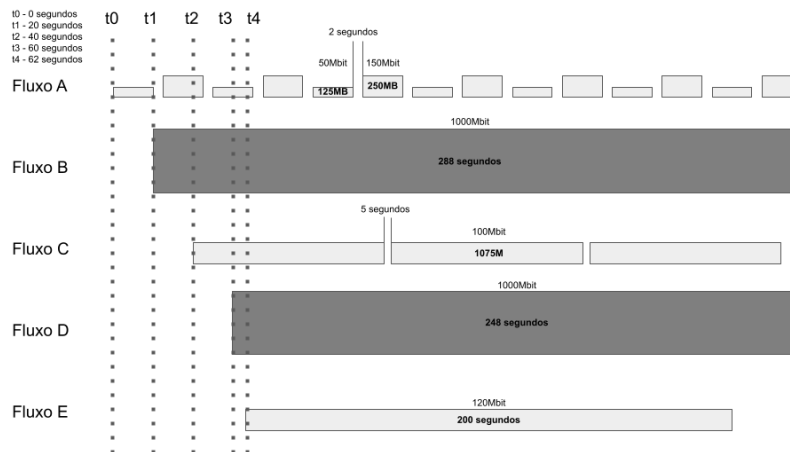


Figura 11. Fluxos concorrentes para validação do ambiente.

- **A:** ciclos alternados de 50 e 150 Mbit/s;
- **B:** fluxo de alta demanda (1 Gbit/s);
- **C:** ciclos de 100 Mbit/s com reinícios periódicos;
- **D:** fluxo de alta demanda (1 Gbit/s), semelhante ao B;
- **E:** fluxo moderado de 120 Mbit/s.

Esse conjunto representa situações reais: coexistência de múltiplos fluxos, competição por recursos e interferência entre tráfegos assimétricos.

5.3. Cenários Avaliados

Os fluxos foram testados em cinco cenários principais:

1. apenas um enlace de 10 Gbps (referência ideal);
2. apenas um enlace de 1 Gbps (situação limitante);
3. dois enlaces de 1 Gbps agregados via LACP (802.3ad);
4. dois enlaces de 1 Gbps agregados pela solução H-DLAFR;
5. dois enlaces de 1 Gbps agregados por H-DLAFR com política H-LARP habilitada.

5.4. Resultados

5.4.1. Cenário 1: Enlace Único de 10 Gbps

O enlace de 10 Gbps serviu como referência ideal. Todos os fluxos atingiram suas vazões máximas sem interferência mútua, conforme Figura 12. A soma das vazões confirma que o enlace comportou simultaneamente toda a carga agregada.

5.4.2. Cenário 2: Enlace Único de 1 Gbps

Com apenas 1 Gbps disponível, todos os fluxos concorreram pelo mesmo meio, causando flutuações significativas de vazão e alta interferência com apresentado na Figura 13. A soma total manteve-se sempre limitada a 1 Gbps, demonstrando um gargalo claro.

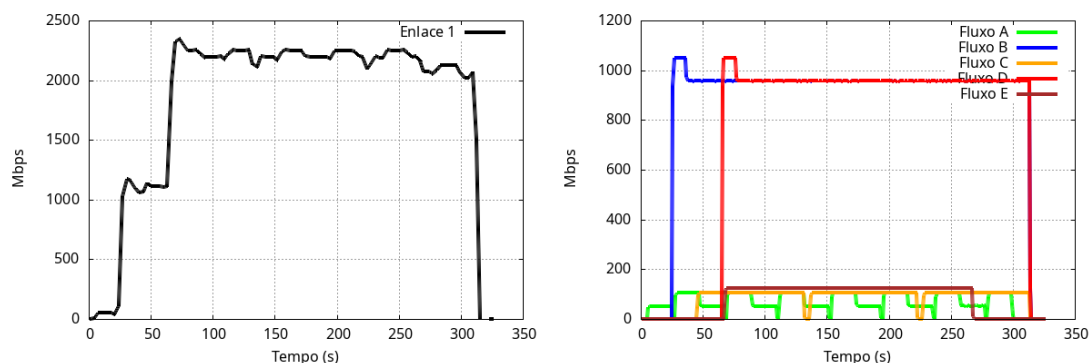


Figura 12. Utilização dos enlaces e fluxos com único enlace de 10Gbps.

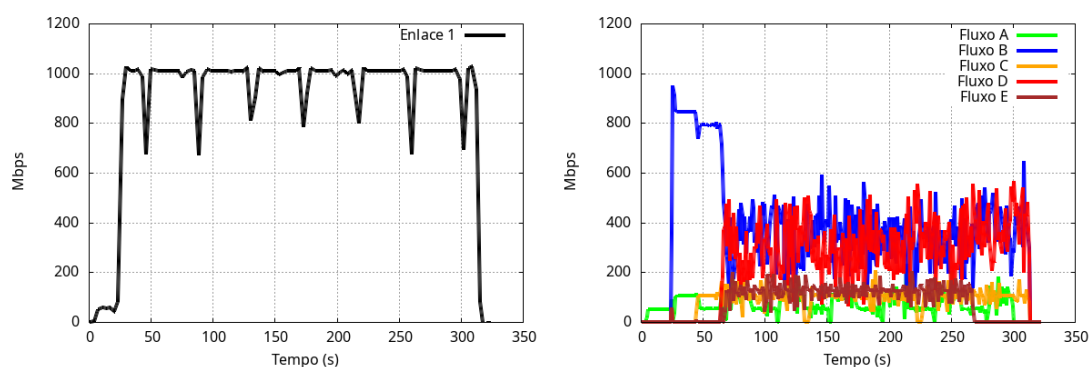


Figura 13. Utilização dos enlaces e fluxos com único enlace de 1Gbps.

5.4.3. Cenário 3: LACP (802.3ad)

No LACP, cada fluxo é atribuído a um enlace segundo a *hash* MAC. Fluxos B e D, ambos de alta demanda, foram mapeados ao mesmo enlace e competiram intensamente, reduzindo sua vazão. Enquanto isso, o segundo enlace ficou subutilizado, como podemos ver na Figura 14.

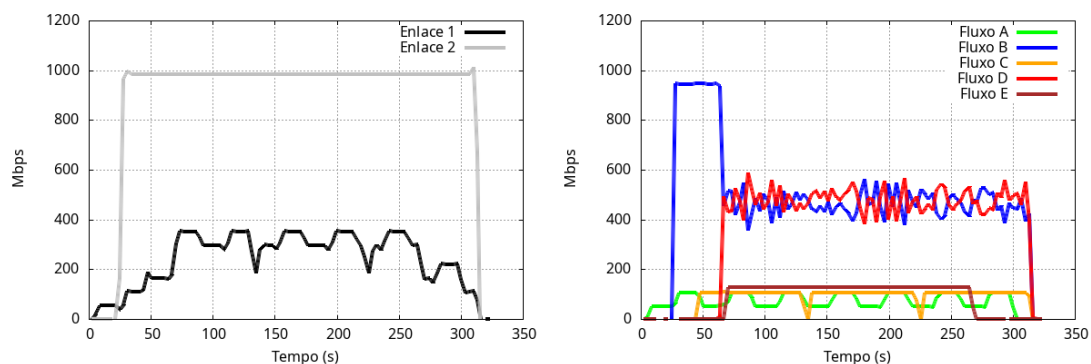


Figura 14. Utilização de dois enlaces de 1Gbps cada e fluxos com LACP-L2.

Este cenário demonstra a limitação do LACP: o balanceamento é estático e dependente do *hash*, não do uso em tempo real.

5.4.4. Cenário 4: H-DLAFR sem Política

A solução H-DLAFR reproduziu o comportamento do LACP-L2, já que utiliza uma estratégia compatível com balanceamento via MAC (round robin). A Figura 15 mostram distribuição idêntica à do LACP.

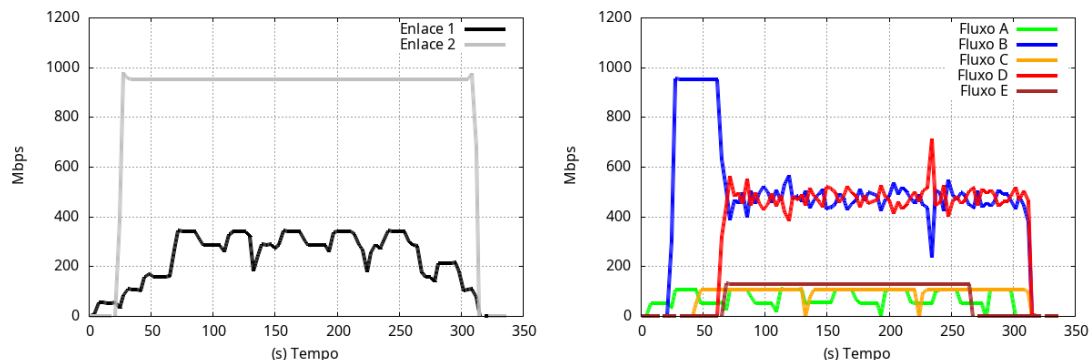


Figura 15. Utilização de dois enlaces de 1Gbps cada e fluxos com H-DLAFR.

Este cenário valida que H-DLAFR pode substituir o LACP sem qualquer configuração no *switch* tradicional, mantendo um comportamento equivalente.

5.4.5. Cenário 5: H-DLAFR com H-LARP (Redistribuição Adaptativa)

Quando a política H-LARP foi habilitada, fluxos B e D, antes competindo no mesmo enlace, passaram a ser redistribuídos entre enlaces após a detecção de sobrecarga com é apresentado na Figura 16. A soma das vazões mostra um uso muito mais equilibrado e próximo dos 2 Gbps agregados.

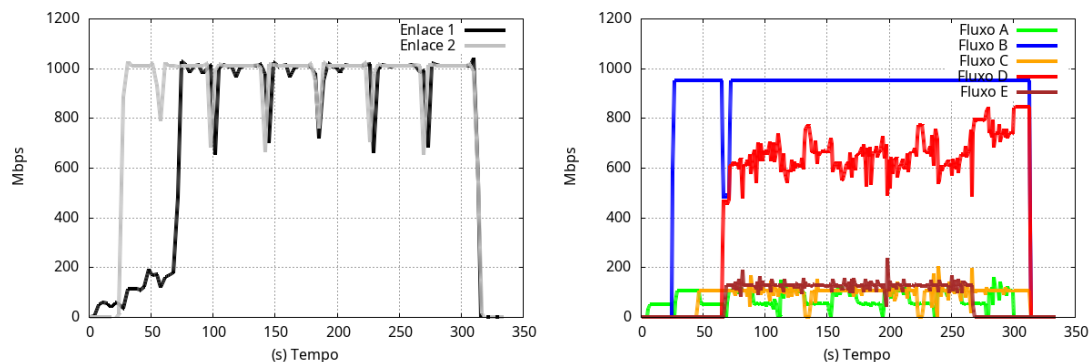


Figura 16. Utilização de dois enlaces de 1Gbps cada e fluxos com H-DLAFR + H-LARP.

Este resultado evidencia que: a inteligência da SDN permite balanceamento real baseado em métricas, impossível em LACP.

5.5. Análise Comparativa

Esta subsecção apresenta uma análise comparativa dos cenários avaliados, considerando métricas de desempenho relacionadas à utilização de banda.

5.5.1. Vazão Total Agregada

A Figura 17 evidencia que as soluções baseadas em LACP e H-DLAFR atingem vazões agregadas da ordem de 1.2–1.3 Gbps, refletindo o comportamento estático do balanceamento nesses modelos. Em contraste, a política H-LARP aproxima-se da soma ideal de 2 Gbps, alcançando o melhor desempenho entre todas as soluções híbridas avaliadas. Esse ganho decorre da redistribuição adaptativa de fluxos de alta demanda entre enlaces distintos, reduzindo gargalos e aumentando a eficiência global da utilização de banda.

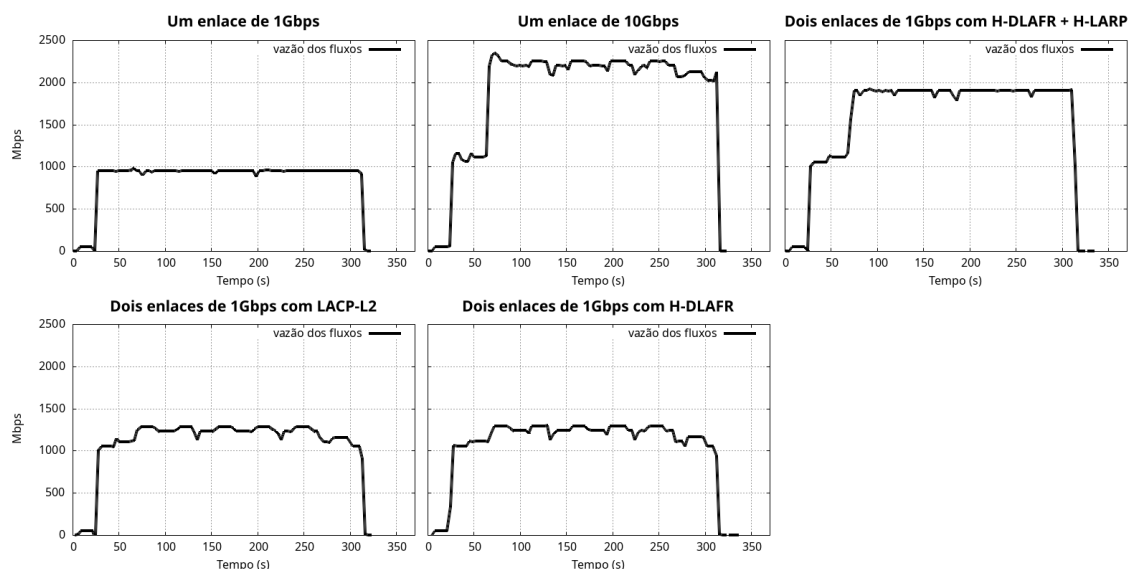


Figura 17. Comparativo da vazão dos fluxos entre os experimentos avaliados.

5.6. Discussão e Considerações Finais

A avaliação experimental demonstrou que a H-DLAFR oferece uma alternativa totalmente automatizada ao LACP, sem exigir configuração no *switch* tradicional, enquanto a política H-LARP introduz uma capacidade de balanceamento adaptativo que supera o modelo tradicional. Os resultados também evidenciam que a integração entre SDN e equipamentos tradicionais é tecnicamente viável e eficiente em ambiente real, e que a manipulação da tabela FDB por meio de pacotes RARP ocorre de forma estável e previsível.

De forma geral, os resultados confirmam que a solução proposta é adequada para redes híbridas e proporciona ganhos concretos de desempenho, especialmente em cenários caracterizados por fluxos assimétricos e alta variação de carga.

Os resultados demonstram que a H-DLAFR alcança desempenho equivalente ao LACP sem exigir configuração manual no *switch* tradicional. Com a ativação da política H-LARP, observa-se aumento significativo da vazão agregada e redução de perdas de pacotes, resultado da adaptação dinâmica dos fluxos em tempo real, o que maximiza a eficiência global da banda disponível.

6. Conclusão

A integração entre H-DLAFR e H-LARP forma uma solução completa para agregação de enlaces em redes SDN híbridas:

- **H-DLAFR**: automatiza a criação e controle de LAGs dinâmicos;
- **H-LARP**: otimiza e redistribui fluxos de forma adaptativa.

A proposta elimina limitações das soluções tradicionais, aproveita a programabilidade SDN e mantém compatibilidade com infraestruturas legadas, resultando em redes mais eficientes, resilientes e inteligentes.

Trabalhos futuros podem explorar técnicas baseadas em aprendizado de máquina para aprimorar as políticas de redistribuição de fluxos, em consonância com tendências recentes em automação inteligente e análise de redes [Sharma et al. 2025].

Agradecimentos

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 405940/2022-0, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto nº 2023/00673-7.

Referências

- Amin, R., Reisslein, M., and Shah, N. (2018). Hybrid sdn networks: A survey of existing approaches. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 20(4):3259–3306.
- Amin, R., Shah, N., Shah, B., and Alfandi, O. (2016). Auto-configuration of acl policy in case of topology change in hybrid sdn. *IEEE Access*, 4:9437–9450.
- Huang, X., Zeng, M., and Xie, K. (2021). Intelligent traffic control for qos optimization in hybrid sdn. *Computer Networks*, 189:107877.
- IEEE (2020). IEEE standard for local and metropolitan area networks – link aggregation. IEEE Std 802.1AX-2020. Standard.
- Junior, R. R. R., Vieira, M. A. M., and Loureiro, A. A. F. (2018). Dynamic link aggregation in software defined networking. In *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 00615–00620.
- Khan, W. U., Shah, N., Muntean, G.-M., Farman, H., Nasralla, M. M., Ullah, S., and Shabir, M. (2025). Optimal acl policy placement in hybrid sdn networks: A reinforcement learning approach. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 6:6095–6113.
- McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., Shenker, S., and Turner, J. (2008). Openflow: Enabling innovation in campus networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 38(2):69–74.
- Sharma, S., Bhardwaj, K., Somani, Y., and Gupta, J. (2025). Predicting network condition events using supervised machine learning and network analysis techniques. In *2025 IEEE International Conference on Advances in Computing Research On Science Engineering and Technology (ACROSET)*, pages 1–5.
- Stallings, W. (1998). Snmp and snmpv2: the infrastructure for network management. *IEEE Communications Magazine*, 36(3):37–43.
- Weiwei, Z., Jian, G., Wenjie, G., and Shaomin, C. (2011). Netflow-based network traffic monitoring. In *2011 13th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium*, pages 1–4.