Departamento de Eletrônica – Escola Politécnica
Programa de Engenharia Elétrica – COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Interconexão de Redes na Internet do Futuro: Desafios e Soluções

Miguel Elias M. Campista, Lyno Henrique G. Ferraz,
Igor M. Moraes, Marcelo Luiz D. Lanza,
Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

http://www.gta.ufrj.br

Este trabalho utilizou recursos da CAPES, CNPq, FAPERJ, FUJB, FUNTTEL e FINEP

Roteiro

- Introdução
- Arquitetura atual da Internet
- Desafios em Interconexão de Redes
- Propostas para a Interconexão de Redes
- Resultados Experimentais
- Considerações Finais

Roteiro

GTA / UFRJ

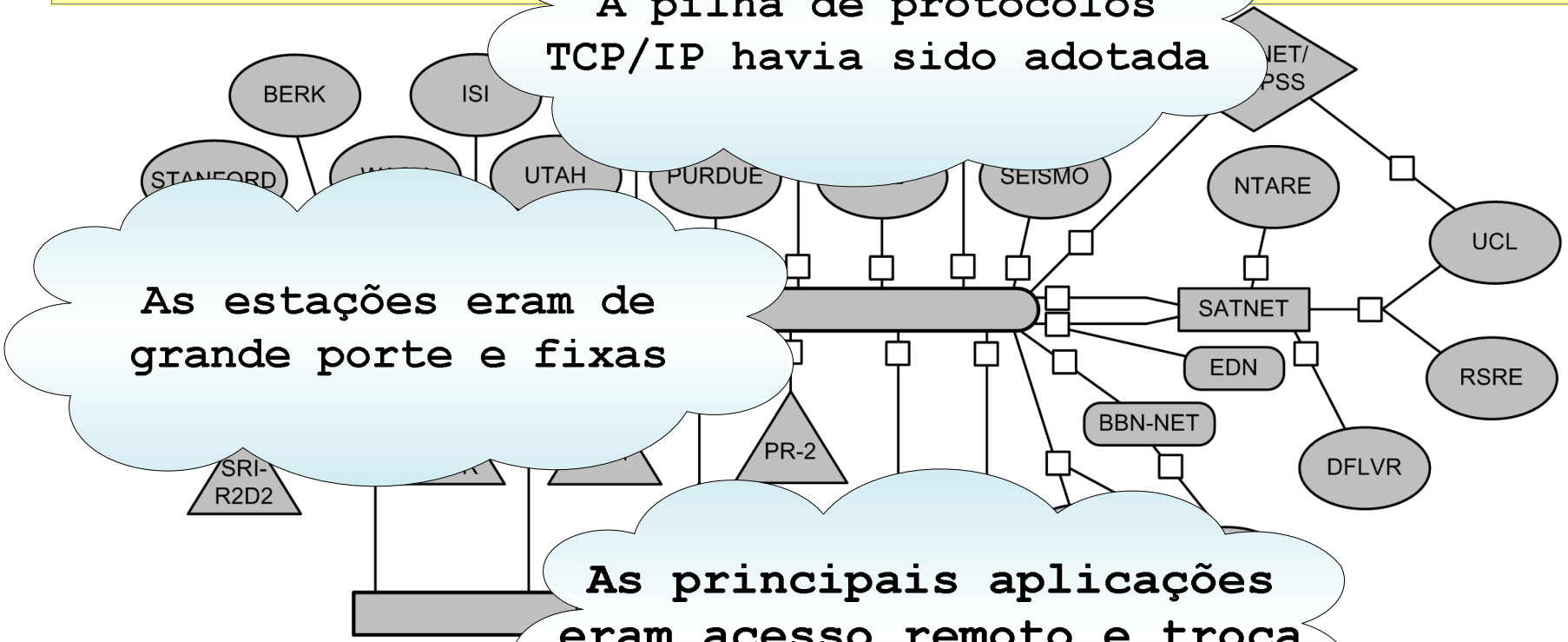
- **Introdução**
- Arquitetura atual da Internet
- Desafios em Interconexão de Redes
- Propostas para a Interconexão de Redes
- Resultados Experimentais
- Considerações Finais

Introdução

GTA / UFRJ

No início dos **ra assim...**

A pilha de protocolos TCP/IP havia sido adotada



As estações eram de grande porte e fixas

As principais aplicações eram acesso remoto e troca de arquivos

Uma rede **ções**
em insti **pesquisa**

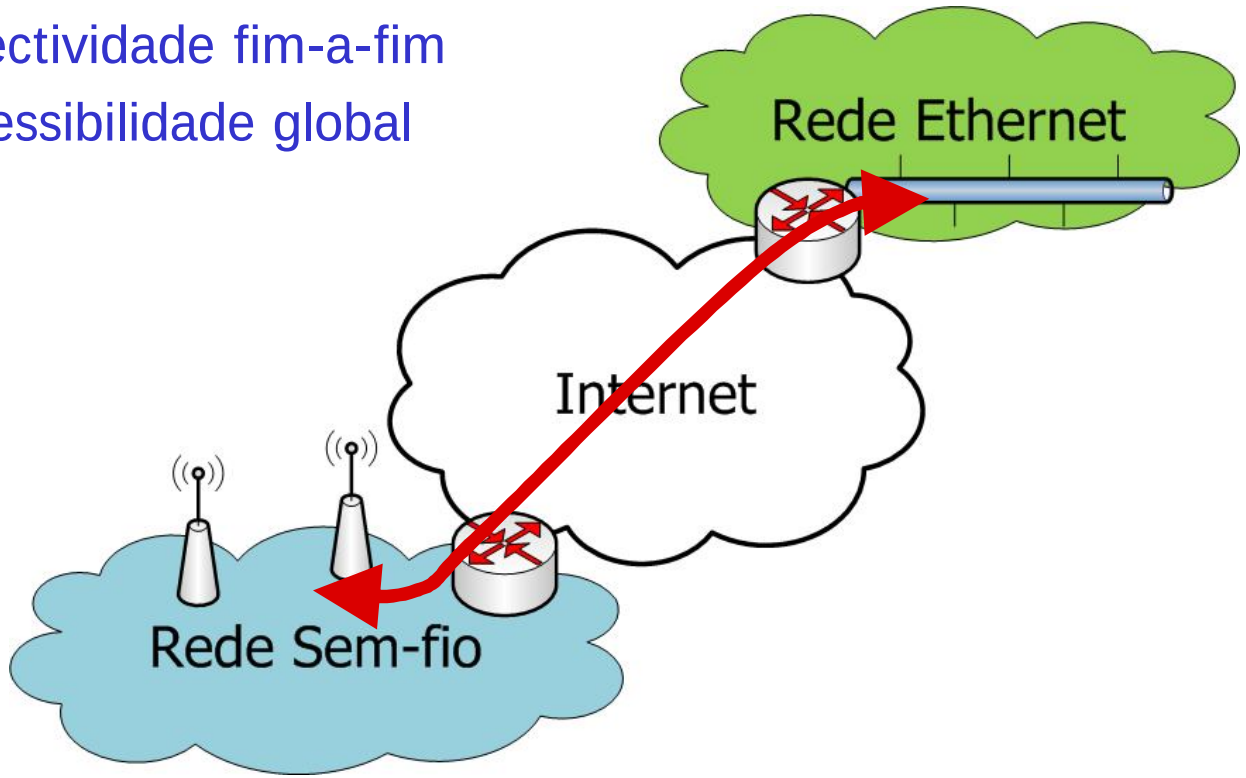
Introdução

- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - Interconectar redes
    - Prover conectividade fim-a-fim
    - Garantir acessibilidade global

Introdução

GTA / UFRJ

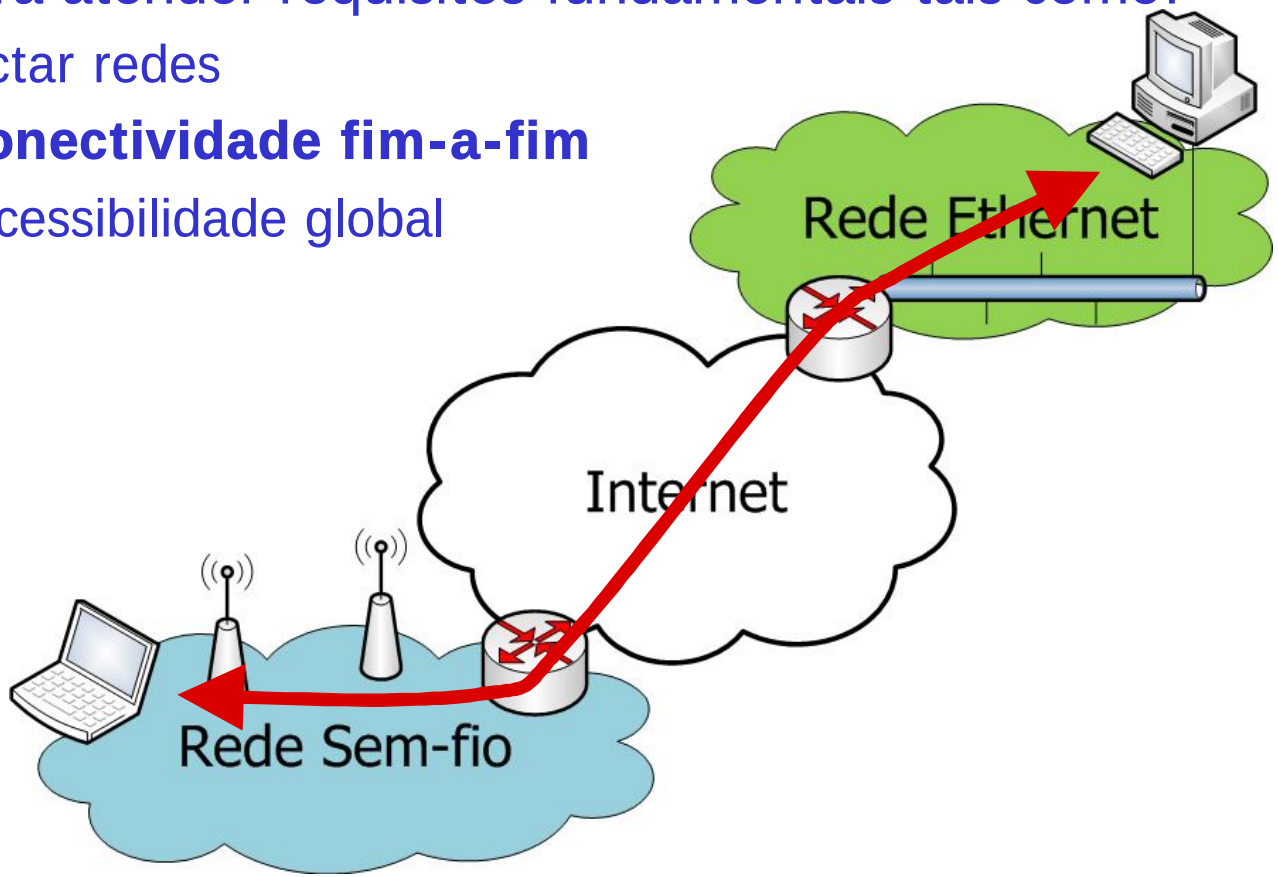
- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - **Interconectar redes**
    - Prover conectividade fim-a-fim
    - Garantir acessibilidade global



Introdução

GTA / UFRJ

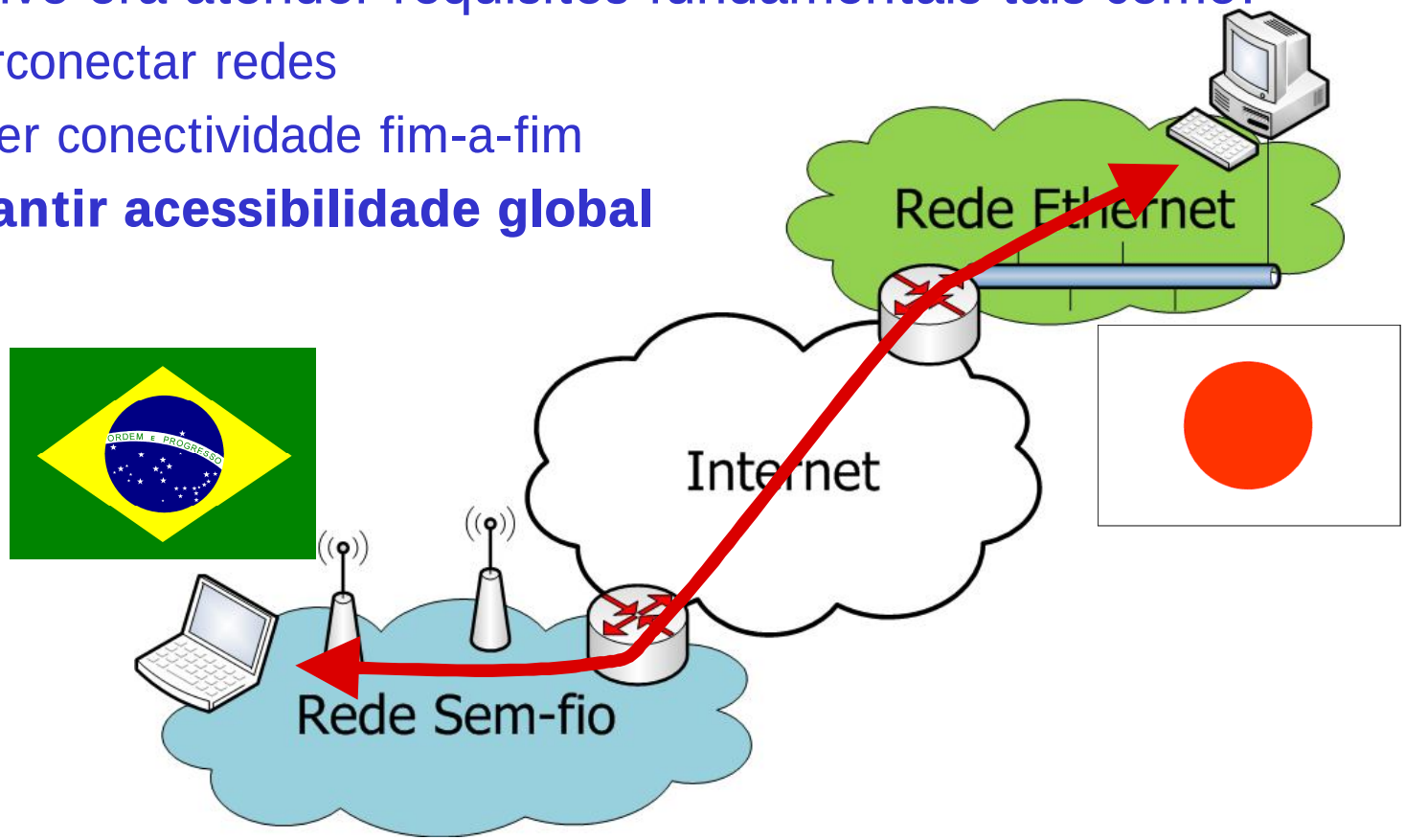
- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - Interconectar redes
    - **Prover conectividade fim-a-fim**
    - Garantir acessibilidade global



Introdução

GTA / UFRJ

- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - Interconectar redes
    - Prover conectividade fim-a-fim
    - **Garantir acessibilidade global**



Introdução

GTA / UFRJ

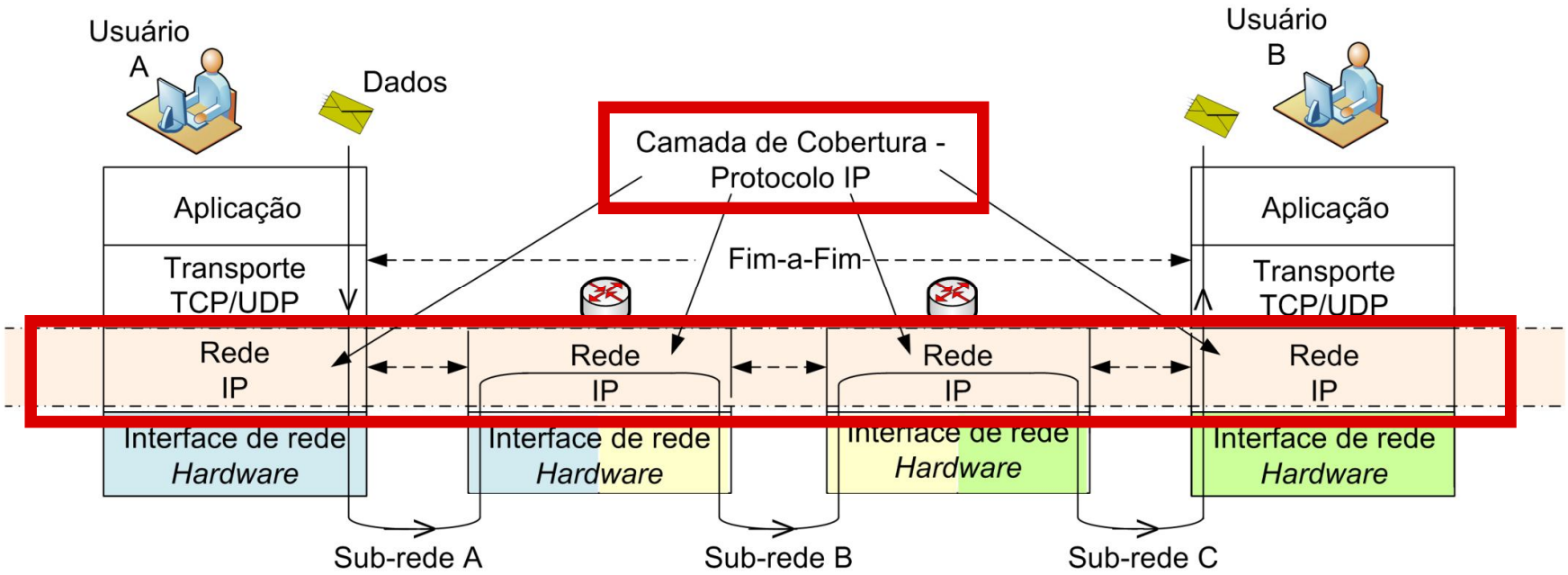
- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - Interconectar redes
    - Prover conectividade fim-a-fim
    - Garantir acessibilidade global

Tais requisito deviam ser atendidos independente da aplicação e da tecnologia de acesso ao meio utilizada

Introdução

GTA / UFRJ

- A Internet dos anos 80
  - O objetivo era atender requisitos fundamentais tais como:
    - Interconectar redes
    - Prover conectividade fim-a-fim
    - Garantir acessibilidade global



Introdução

GTA / UFRJ

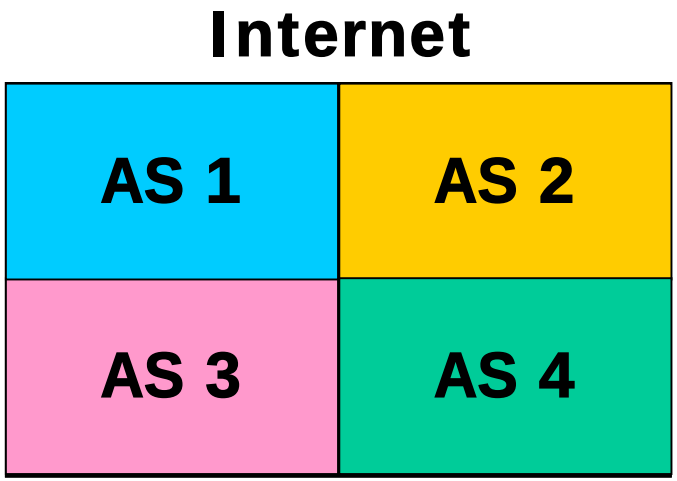
- A Internet dos anos 80
  - Os protocolos de roteamento cumpriam mesma função atual
    - Entretanto,
      - O menor caminho entre qualquer origem-destino era encontrado
      - Ex.: GGP (*Gateway-to-Gateway Protocol*)
        - Listava em suas mensagens de atualização as distâncias para todas as redes da Internet (até 256 redes)

A Internet era composta por poucos nós e era subdividida em poucas instituições

Crescimento da Internet

GTA / UFRJ

- Nos anos seguintes a Internet cresceu aceleradamente...
  - Atualizações de topologia se tornaram mais frequentes
    - Atualizações do GGP se tornaram mais complexas
    - Mais de uma versão do GGP era utilizada



A Internet foi dividida em diferentes Sistemas Autônomos (AS – *Autonomous System*)

Crescimento da Internet

GTA / UFRJ

- Sistemas autônomos: Conjunto de redes e roteadores administrados por um grupo ou uma instituição comum
  - Cada instituição escolhe o seu próprio protocolo de roteamento interno
    - Protocolo **intradomínio**
  - Todas as instituições executam o mesmo protocolo de roteamento externo
    - Protocolo **interdomínio**

O uso de um protocolo interdomínio comum é um requisito para que todos os Sistemas Autônomos mantenham conectividade

Crescimento da Internet

- Primeiro protocolo interdomínio
  - EGP (*Exterior Gateway Protocol*)
    - Sucumbiu por problemas de escalabilidade...
- Protocolo BGP (*Border Gateway Protocol*)
  - Substituiu o EGP
  - Tornou-se o protocolo interdomínio da Internet
    - Permanece até os dias de hoje

Internet Atual

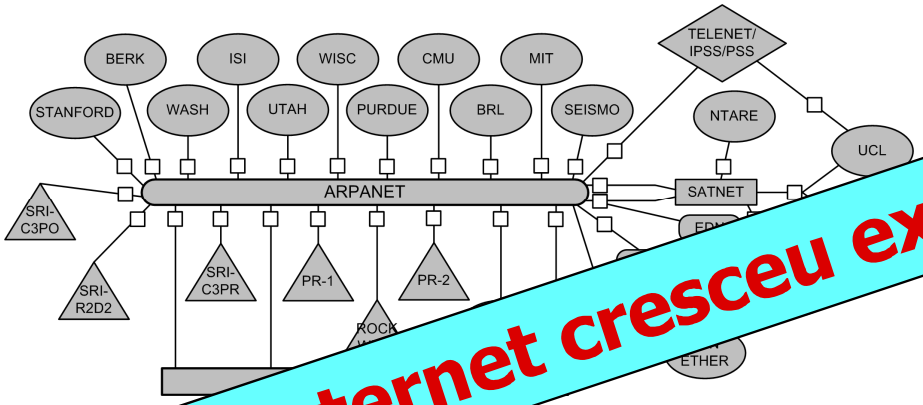
- Organização da Internet
  - Mesma que surgiu após a divisão em Sistemas Autônomos
- Principais objetivos
  - Mesmos requisitos fundamentais originais

- Protocolos
  - Interdomínio
    - BGP (*Border Gateway Protocol*)
  - Intradomínio
    - RIP (*Routing Information Protocol*), OSPF (*Open Shortest Path First*), IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*) etc.

Internet Atual

GTA / UFRJ

- Entretanto...



A Internet cresceu exponencialmente!

A Internet nos anos 80

A Internet atual

Internet Atual

- O crescimento da Internet foi de **380,3%**
  - **De 2000 até 2009** [Internet World Stats 2010]
    - Crescimento impulsionado pela oportunidade de negócios e pela popularização da Internet
      - Acordos para tráfego de dados entre ASes vizinhos
      - Facilidade de uso e rapidez da obtenção de informação
- O número de redes /24 é de **7,4 milhões**
  - **Em 2010** [Caida 2010]
    - Essas redes representam 95% de todas as redes alcançáveis na Internet

Internet Atual

GTA / UFRJ

- Assim como ocorreu no passado...
  - Mais uma vez a Internet necessita de mudanças
    - O sucesso da Internet não vem sem consequências
      - Protocolos como o BGP e o IP mostram sinais de fadiga

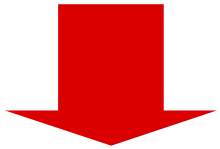
O BGP já está em sua quarta versão, a última atualização do protocolo foi em 2006

Embora fundamental, os problemas do BGP estão relacionados com as limitações do IP

Limitações do IP

GTA / UFRJ

- O IP não acompanhou no mesmo passo a evolução da Internet
  - Projeto inicial do IP
  - Protocolos de roteamento existentes



Não foram desenvolvidos tendo em vista a possibilidade de evoluir para atender demandas emergentes

Demandas Emergentes

GTA / UFRJ

- Dentre as demandas emergentes estão:
  - Suporte à mobilidade
  - Suporte aos múltiplos caminhos
  - Suporte aos múltiplos domicílios
  - Escalabilidade dos roteadores
- Novas propostas e extensões:
  - IPv6
  - IP móvel
  - Multicast

Nenhuma delas solucionou o problema por completo ou não chegaram a ser adotadas plenamente na prática

Internet do Futuro

- Qual seria a melhor abordagem?
  - **Ruptura total com o modelo atual?**
    - Altos custos de adoção
  - **Continuação do desenvolvimento de extensões?**
    - Adiamento dos mesmos problemas atuais
- **Modelo totalmente flexível?**
  - Atendimento de todas as demandas emergentes

    ou
  - Permanência de casos a parte
- Em qualquer um dos casos...
  - Proposta deve ser escalável e evolutiva

Neste Minicurso

- A arquitetura atual da Internet
- Os principais desafios enfrentados na Internet atual
  - Provimento das demandas emergentes
- Novos conceitos para interconexão de redes na Internet do Futuro
- Novos protocolos de roteamento
- Resultados experimentais

Roteiro

- Introdução
- **Arquitetura atual da Internet**
- Desafios em Interconexão de Redes
- Propostas para a Interconexão de Redes
- Resultados Experimentais
- Considerações Finais

Arquitetura da Internet

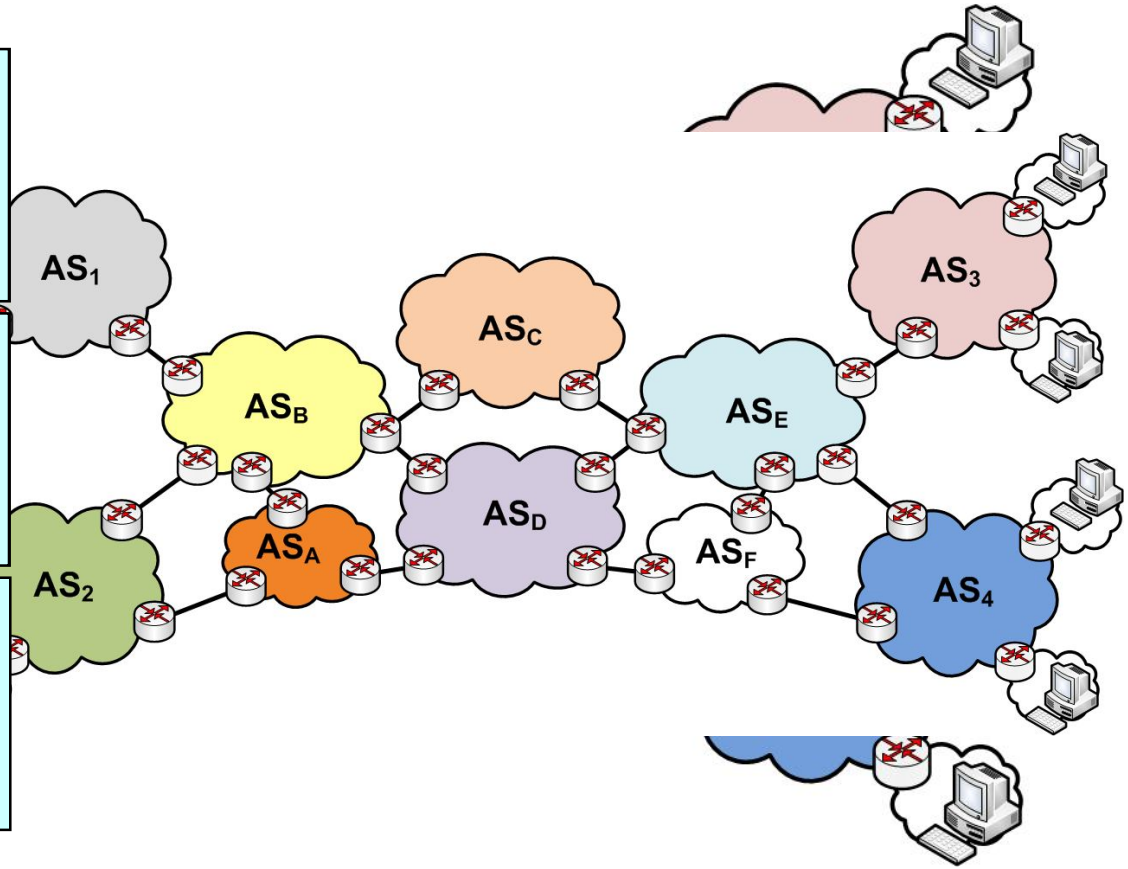
GTA / UFRJ

- Composta por diferentes redes interconectadas
  - Protocolo de interconexão: **IP**

Redes administradas pela mesma instituição formam um AS

Cada AS tem o seu próprio protocolo intradomínio

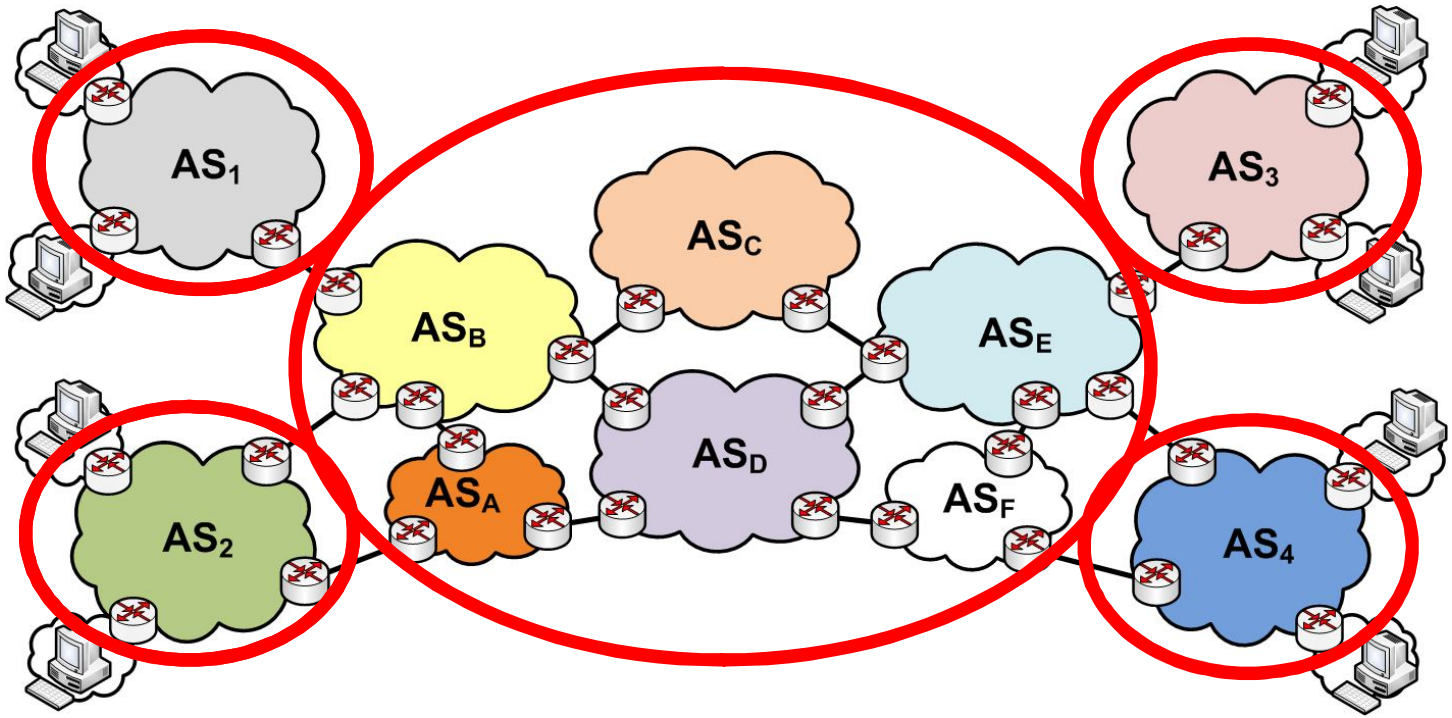
Todos os ASes executam o mesmo protocolo interdomínio



Classificação dos ASes

GTA / UFRJ

- Feita a partir da posição na topologia da Internet

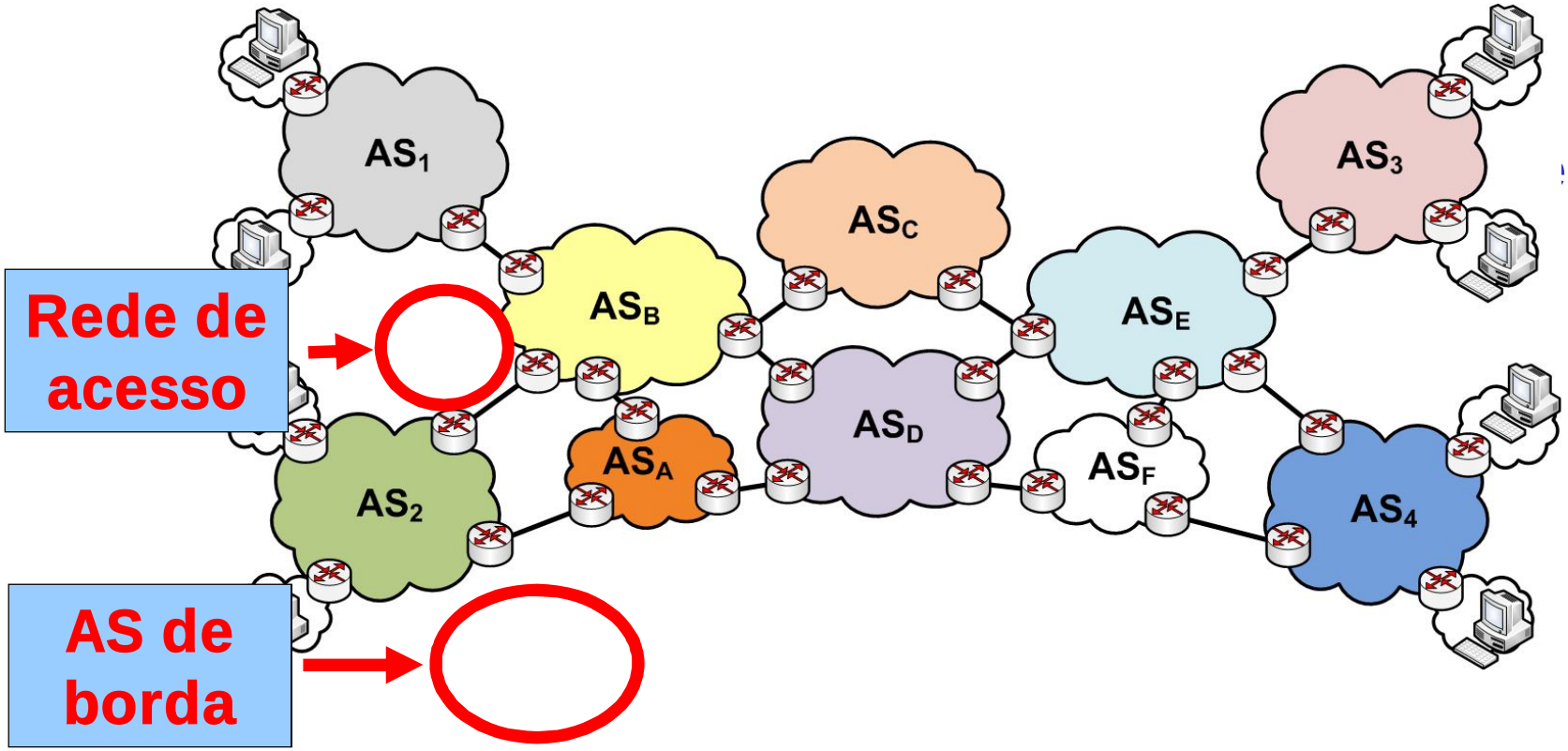


ASes que não estão conectados a usuários → ASes de trânsito

Classificação dos ASes

GTA / UFRJ

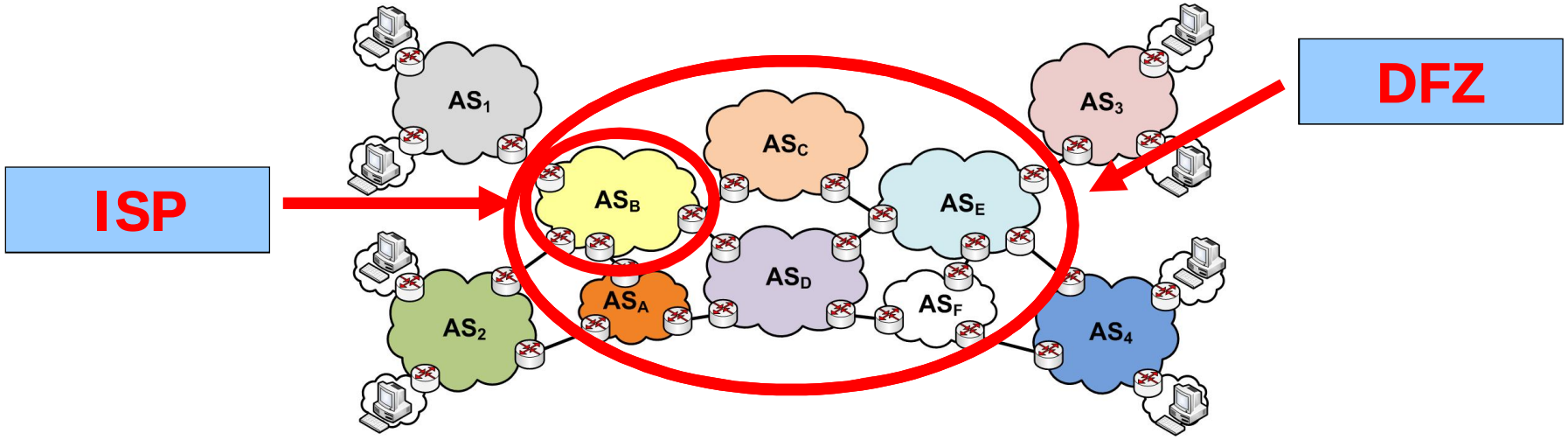
- ASes de borda ou provedores de acesso
  - Tarifam os usuários pelo acesso à Internet



Classificação dos ASes

GTA / UFRJ

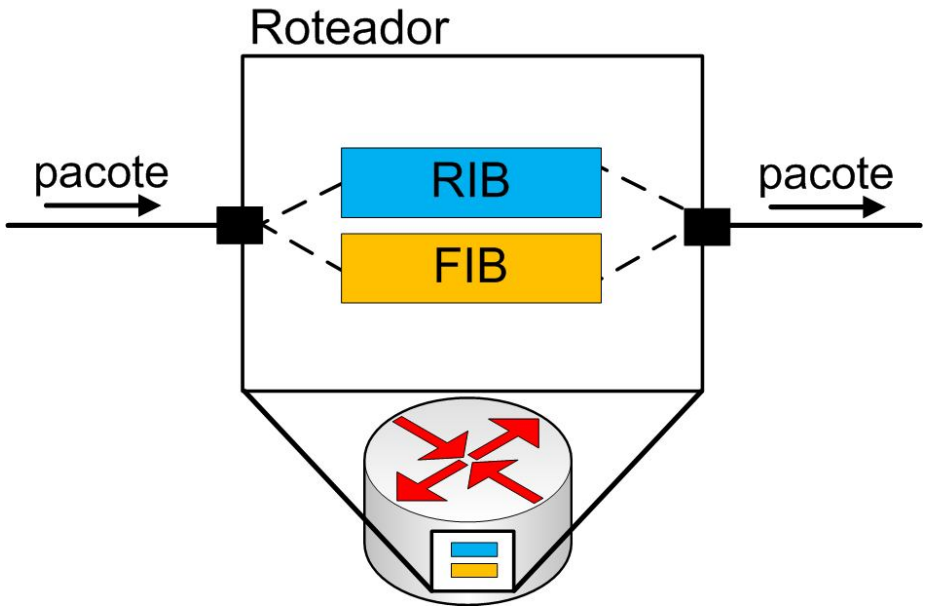
- ASes de trânsito (*Internet Service Provider* – ISP)
  - Não estão diretamente conectados a usuários
    - Ausência de rotas *default* (*Default Free Zone* - DFZ)
  - Encaminham dados entre ASes
    - Os ASes estabelecem acordos comerciais com os seus vizinhos
    - Responsáveis pelos ASes → ISP (*Internet Service Provider*)



Bases de Dados do Roteamento

GTA / UFRJ

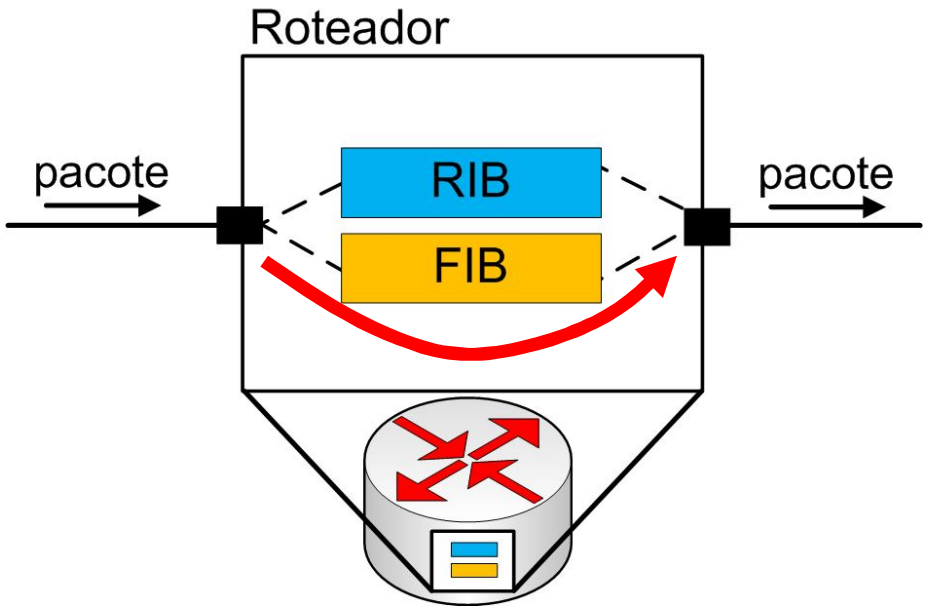
- Os roteadores da Internet possuem duas bases de dados:
  - FIB (*Forward Information Base*)
  - RIB (*Routing Information Base*)



Bases de Dados do Roteamento

GTA / UFRJ

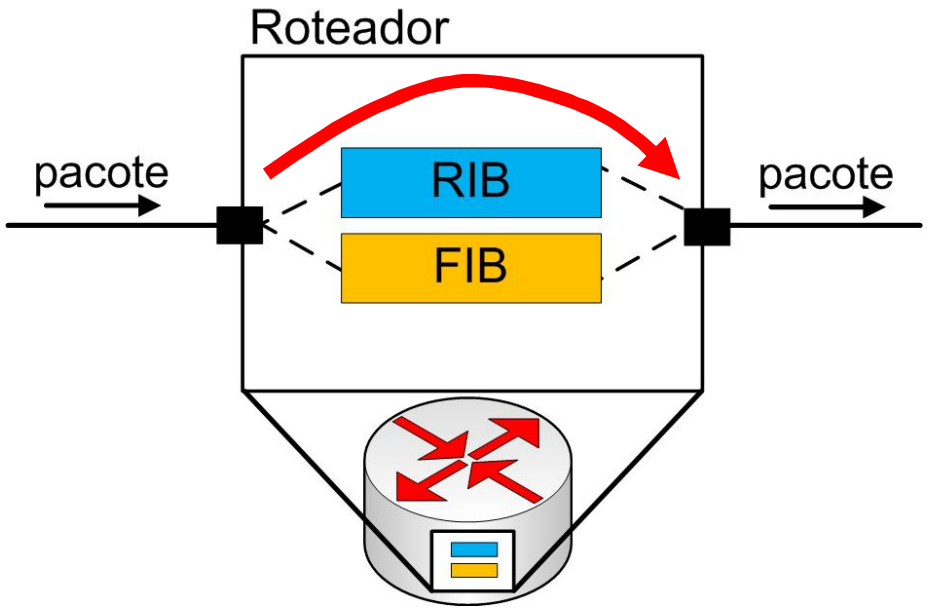
- FIB (*Forward Information Base*)
  - Tabela de roteamento consultado para encaminhamento de pacote
    - **Caminho de dados**



Bases de Dados do Roteamento

GTA / UFRJ

- RIB (*Routing Information Base*)
  - Base de dados utilizada para construir a FIB
    - **Caminho de controle**



Desafios da Internet

GTA / UFRJ

- Arquitetura planejada inicialmente nos anos 80
  - Não previu o sucesso da Internet
    - Crescimento acelerado
  - Não previu a evolução das aplicações e casos de uso
    - Surgimento de novos requisitos e demandas

Quais são essas novas demandas?

Roteiro

- Introdução
- Arquitetura atual da Internet
- **Desafios em Interconexão de Redes**
- Propostas para a Interconexão de Redes
- Resultados Experimentais
- Considerações Finais

Desafios em Interconexão de Redes

- Demandas emergentes não previstas:
  - Suporte a mobilidade
  - Suporte a múltiplos domicílios
  - Suporte a múltiplos caminhos
  - Suporte a caminhos programáveis
  - Suporte a aumento acelerado da Internet

Suporte a Mobilidade

GTA / UFRJ

- Requisito das redes sem-fio
  - Principal desafio à arquitetura original da Internet
    - Estações móveis ***Vs.*** Estações fixas

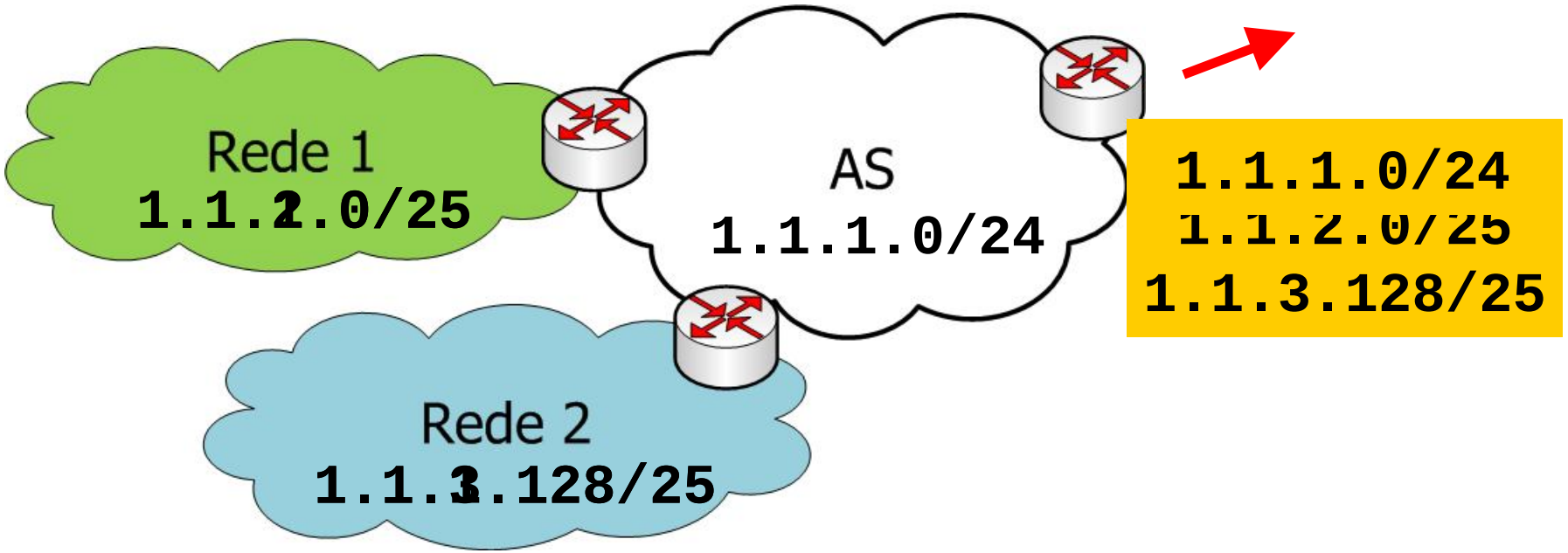
Ex.: Operação do protocolo TCP considera que atrasos e perda de pacotes são devido a congestionamentos na rede, já que as perdas são negligenciáveis

Nas redes sem-fio essa premissa não é verdadeira...

Suporte a Mobilidade

GTA / UFRJ

- Desafios na interconexão de redes
  - Relacionados ao endereçamento e roteamento de pacotes
    - Estrutura original de endereços é organizada hierarquicamente
      - Possibilita a agregação de rotas



Estrutura do Endereçamento IP

- Possibilitou a agregação de rotas
  - Aumento da escalabilidade do roteamento
    - Menor número de entradas nas tabelas de roteamento
  - Simplificação da busca de entradas nas FIBs

Entretanto...

- Levou à organização geográfica dos endereços IP
  - Associação do endereço IP com a **localização** da estação
  - Tradução da **identificação** da estação no endereço IP
    - DNS (*Domain Name System*)

Estrutura do Endereçamento IP

- Endereço IP ≡ Identificação + Localização

Problema da "semântica sobrecarregada" do endereço IP

- Problema representa um entrave à mobilidade das estações

Movimentação das estações → **Mudança da localização** → **Mudança do endereço IP**

Mobilidade das Estações

GTA / UFRJ

Conexão TCP estabelecida:
Nó Móvel: Endereço IP_A, Porta
Nó Internet: Endereço IP_I, Porta

O modelo atual da Internet assume que os endereços IP são invariantes ao longo de toda conexão

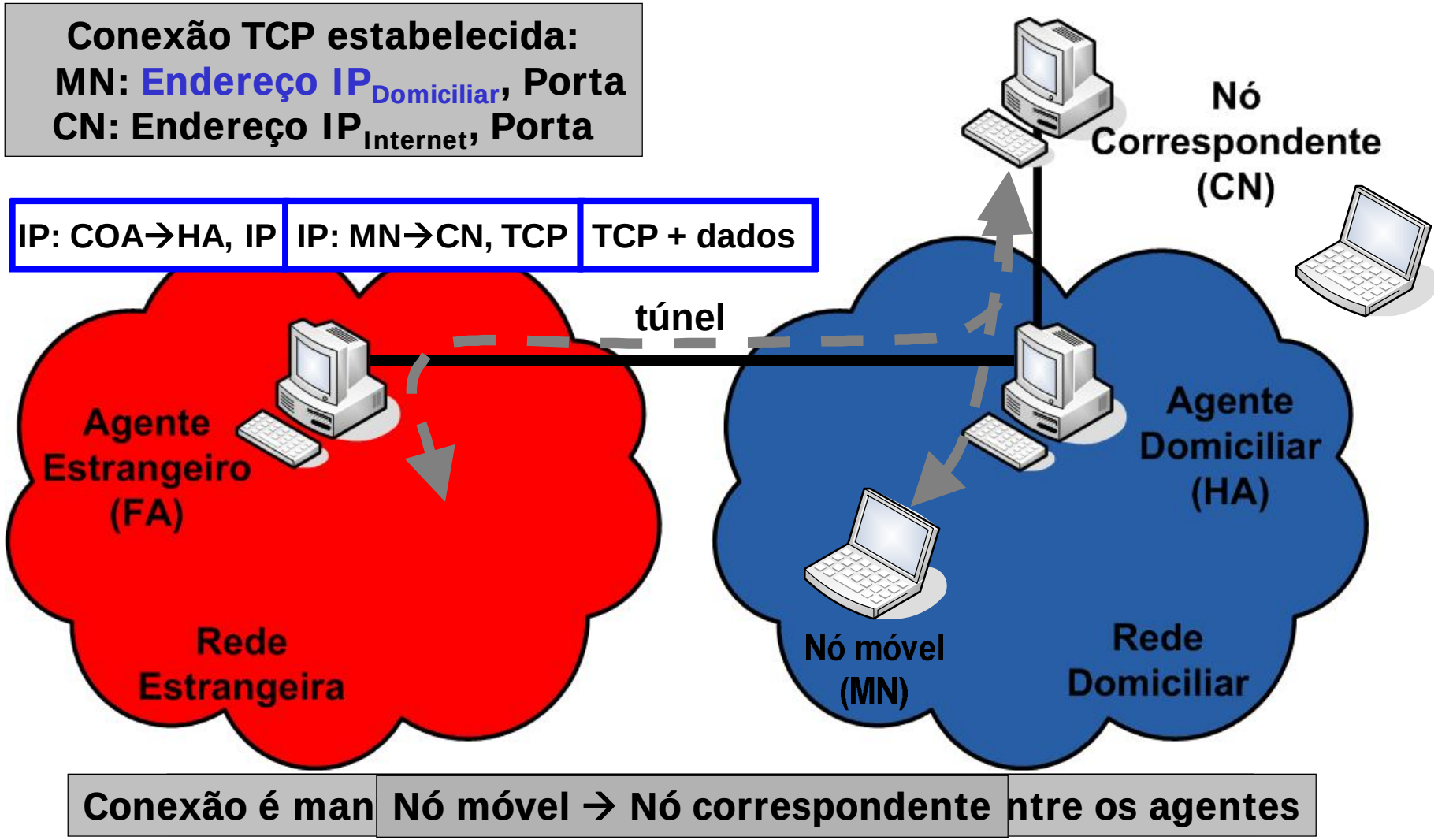
Conexão é terminada já que o Endereço IP do nó móvel muda

Mobilidade das Estações

- Possíveis soluções
  - IP Móvel
    - Endereço IP da estação é mantido após mudança de rede
      - Uso de túneis
      - Manutenção das conexões pré-estabelecidas
    - Nomenclatura
      - Nó móvel (*Mobile Node* - MN)
      - Nó correspondente (*Corresponding Node* – CN)
      - Agente estrangeiro (*Foreign Agent* – FA)
      - Agente domiciliar (*Home Agent* – HA)
      - *Care of Address* (CoA)
      - Rede estrangeira e domiciliar

Funcionamento Básico do IP Móvel

GTA / UFRJ



Limitações do IP Móvel

- Encaminhamento indireto
  - Caminho percorrido pelos pacotes é mais longo
    - Pacotes são encaminhados através dos agentes domiciliar e estrangeiro
  - “Problema da triangulação”
- Estabelecimento do túnel
  - Possível latência na comunicação entre os agentes domiciliar e estrangeiro

IPv6 Móvel

- Dispensa o uso do agente estrangeiro
  - Túnel é estabelecido entre o agente domiciliar e o nó móvel
- Encaminhamento sem passar pelo agente domiciliar
  - Pacotes são enviados das estações na Internet diretamente para o nó móvel
    - Extensão de cabeçalho do IPv6
      - Endereço IP da rede estrangeira é utilizado como origem
      - Endereço da rede domiciliar é listado na extensão

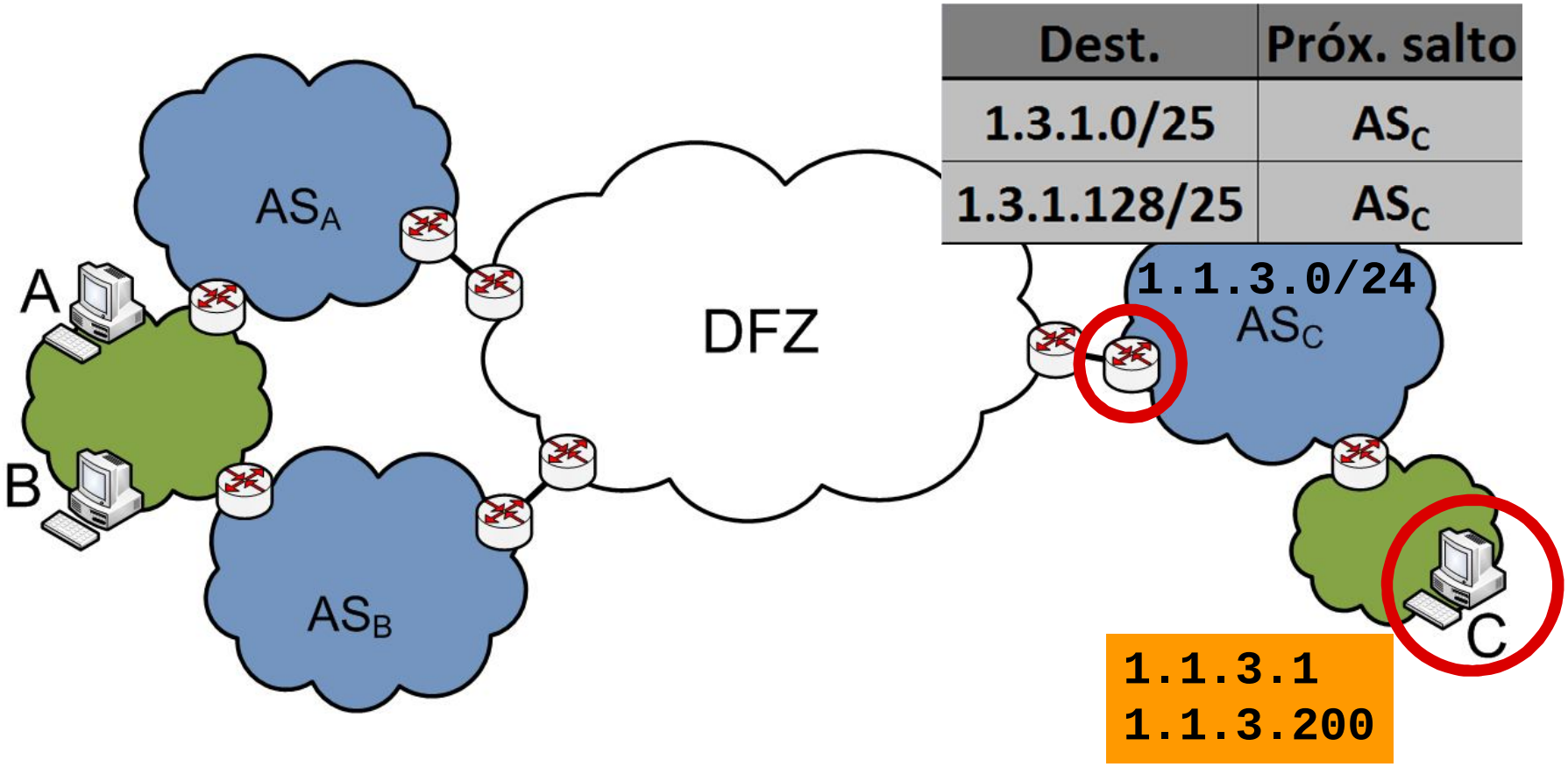
O IPv6 móvel enfrenta problemas de adoção devido ao uso do próprio IPv6 e ainda não resolve plenamente a questão da mobilidade

Suporte a Múltiplos Domicílios

- Múltiplos domicílios (*multi-homing*)
  - Redes ou estações que acessam a Internet por múltiplas conexões
    - Através de ISPs diferentes
    - Através do mesmo ISP, mas em faixas diferentes de endereço
  - Estações multidomiciliada *Vs.* Rede multidomiciliada
    - Estações com interfaces configuradas com endereços IP diferentes
    - Redes com pontos de interconexão conectados a ISPs diferentes

Estação Multidomiciliada

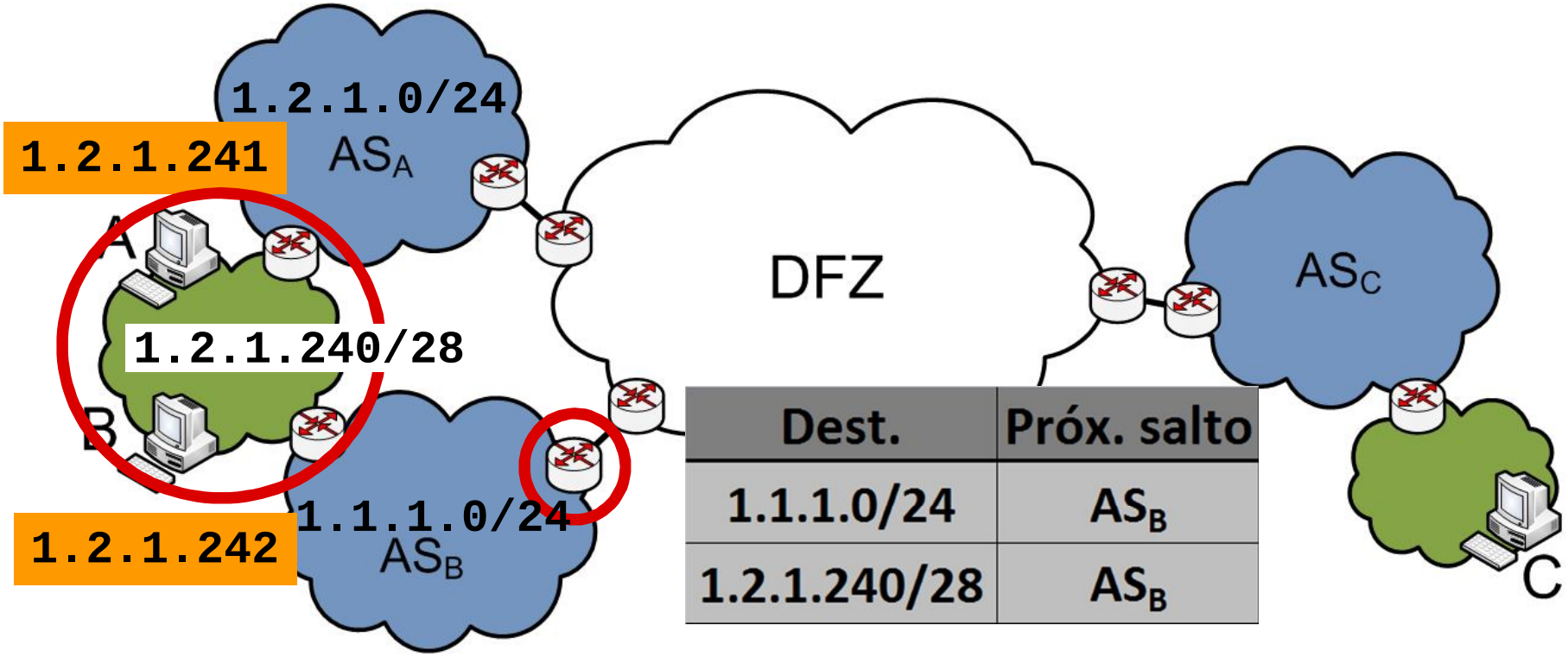
GTA / UFRJ



Roteador de borda deve anunciar caminhos para faixas de endereços IP disjuntas

Estação Multidomiciliada

GTA / UFRJ



Dest.	Próx. salto
1.1.1.0/24	AS_B
1.2.1.240/28	AS_B

Roteador de borda deve anunciar caminhos para duas redes

Vantagens dos Múltiplos Domicílios

- Aumento da confiabilidade na comunicação com a Internet
  - Em caso de falhas, ainda há alternativas para conexão
- Engenharia de tráfego
  - Tráfego pode ser dividido entre as múltiplas conexões
- Aumento da vazão agregada
  - Aumento do número de opções de saída de tráfego
- Redução de custos
  - Uso de ISP mais caro somente para tráfego sensível

Desafios dos Múltiplos Domicílios

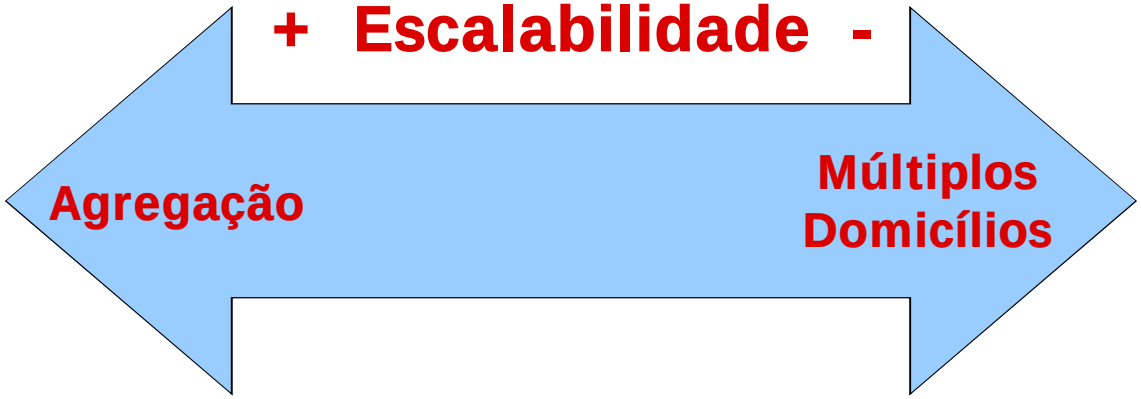
- Múltiplas faixas podem ser:
  - Alocadas pelo ISP (***provider assigned***)
  - Independentes do ISP (***provider independent***)
    - Faixa alocada por órgão de distribuição de endereços
      - Facilita a reconfiguração de endereços na troca de ISP
      - Entretanto, viola a organização hierárquica da Internet
        - Provedor passa a ter que anunciar faixas de endereços de outros provedores

Agrava o problema de desagregação de endereços

Desafios dos Múltiplos Domicílios

GTA / UFRJ

- Anúncio de faixas de endereços desagregadas
  - Problemas de escalabilidade



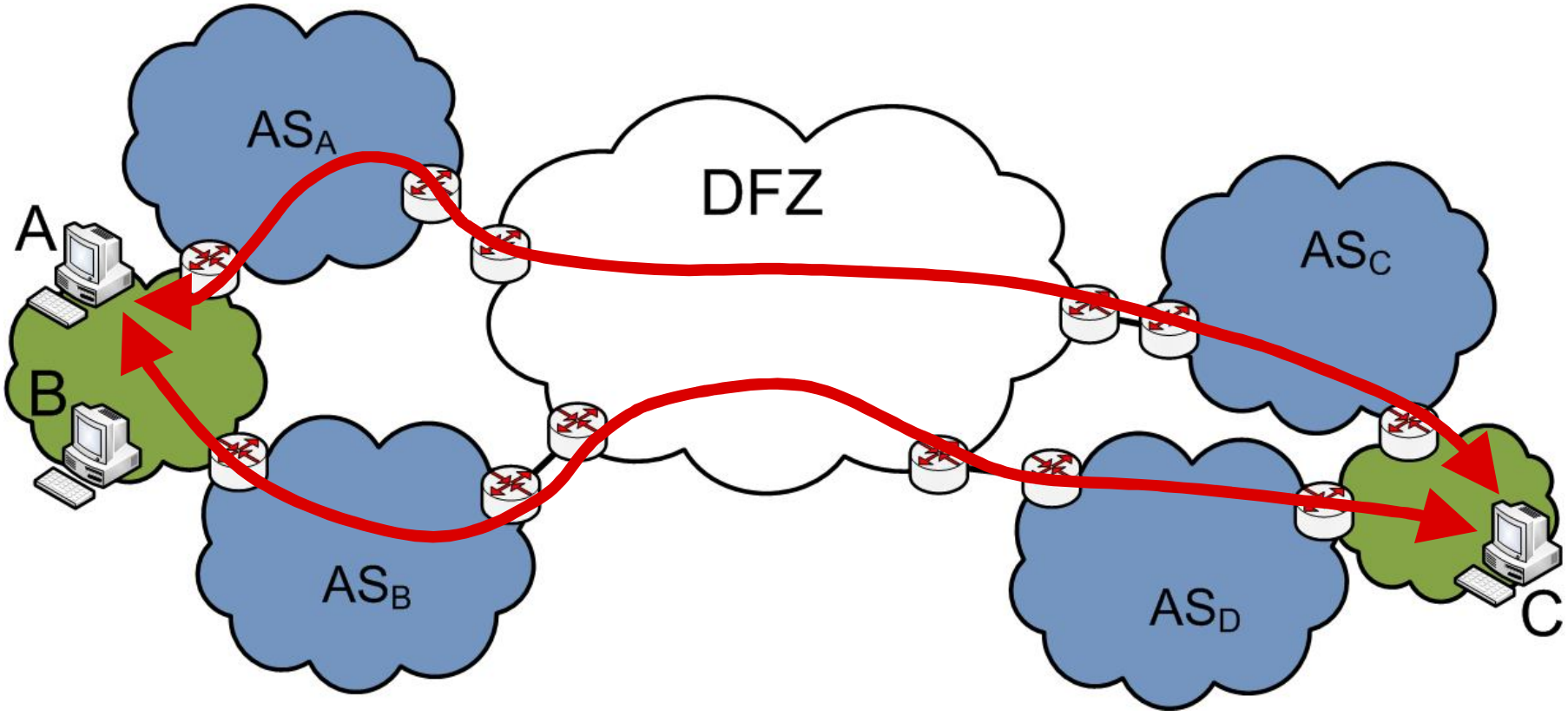
Anunciar faixas de endereços IP desagregadas implica problemas de escalabilidade, como o aumento das tabelas BGP

Suporte a Múltiplos Caminhos

- Protocolos típicos de roteamento
  - Escolhem apenas um caminho entre qualquer par origem-destino na rede
    - Mantêm em suas FIBs apenas uma opção até o destino
  - Protocolos intradomínio (Ex.: RIP e OSPF)
    - Oferecem alguns variantes com múltiplos caminhos
      - Pouco utilizadas na prática...
  - Protocolo interdomínio (BGP)
    - Depende da cooperação entre ASes para ser efetivo
      - Não é realizado na prática...

Encaminhamento através de Múltiplos Caminhos

GTA / UFRJ



Dados são encaminhados <u>ao mesmo</u> tempo pelos dois caminhos

Vantagens dos Múltiplos Caminhos

- Aumento de confiabilidade e flexibilidade no roteamento
  - Múltiplos caminhos são mais resistentes a falhas
  - Múltiplos caminhos permitem distribuição de carga
- Escolha do caminho conforme requisitos da aplicação
  - Caminhos com maior banda ou maior atraso
- Prevenção de caminhos congestionados

Vantagens dos Múltiplos Caminhos

- Medidas demonstram que caminhos alternativos existem
  - Em 30 a 80% do tempo, existe um caminho alternativo com perda e atraso menor que o caminho utilizado

Então, por que não usá-los na prática?

Desafios dos Múltiplos Caminhos

- Os múltiplos caminhos esbarram em desafios como:
  - Limitações de camadas superiores
    - Desordenamento de pacotes enviados com o TCP
- Escalabilidade
  - Armazenamento de múltiplos caminhos nas FIBs
  - Aumento da complexidade do cálculo do caminho mais curto
- Políticas
  - Múltiplos caminhos devem atravessar qualquer AS
    - Maior complexidade no estabelecimento de políticas

Limitações do BGP

- Caminho depende das políticas entre os ISPs
  - Estabelecimento de acordos comerciais
- Cada ISP anuncia apenas uma opção de caminho para outras redes através de si próprio
  - Cada ISP anuncia apenas **um** caminho ativo

- Entretanto...
  - Se mais de um caminho ativo fosse conhecido
    - ISPs perderiam controle do tráfego em sua própria rede
      - Quais seriam os caminhos escolhidos pelos seus vizinhos?

Opções Atuais para Múltiplos Caminhos

GTA / UFRJ

- Opções que dispensam o anúncio de múltiplos caminhos:
  - Roteamento por fonte
    - Cada ISP pode “forçar” os caminhos escolhidos
  - Redes Sobrecamada (*Overlay*)
    - Redes formadas em camadas superiores

Em ambas os casos o ISP perde parte do controle do tráfego em sua rede já que as políticas de cada ISP e as ligações na camada física são desconsideradas

Suporte a Caminhos Programáveis

- Caminhos seguidos pelos pacotes na Internet são definidos pelos protocolos de roteamento
  - Protocolos de roteamento intradomínio
    - Escolhem o melhor caminho baseado em métricas
  - Protocolos de roteamento interdomínio
    - Consideram acordos comerciais para escolher qual dos ISPs vizinhos deve ser utilizado

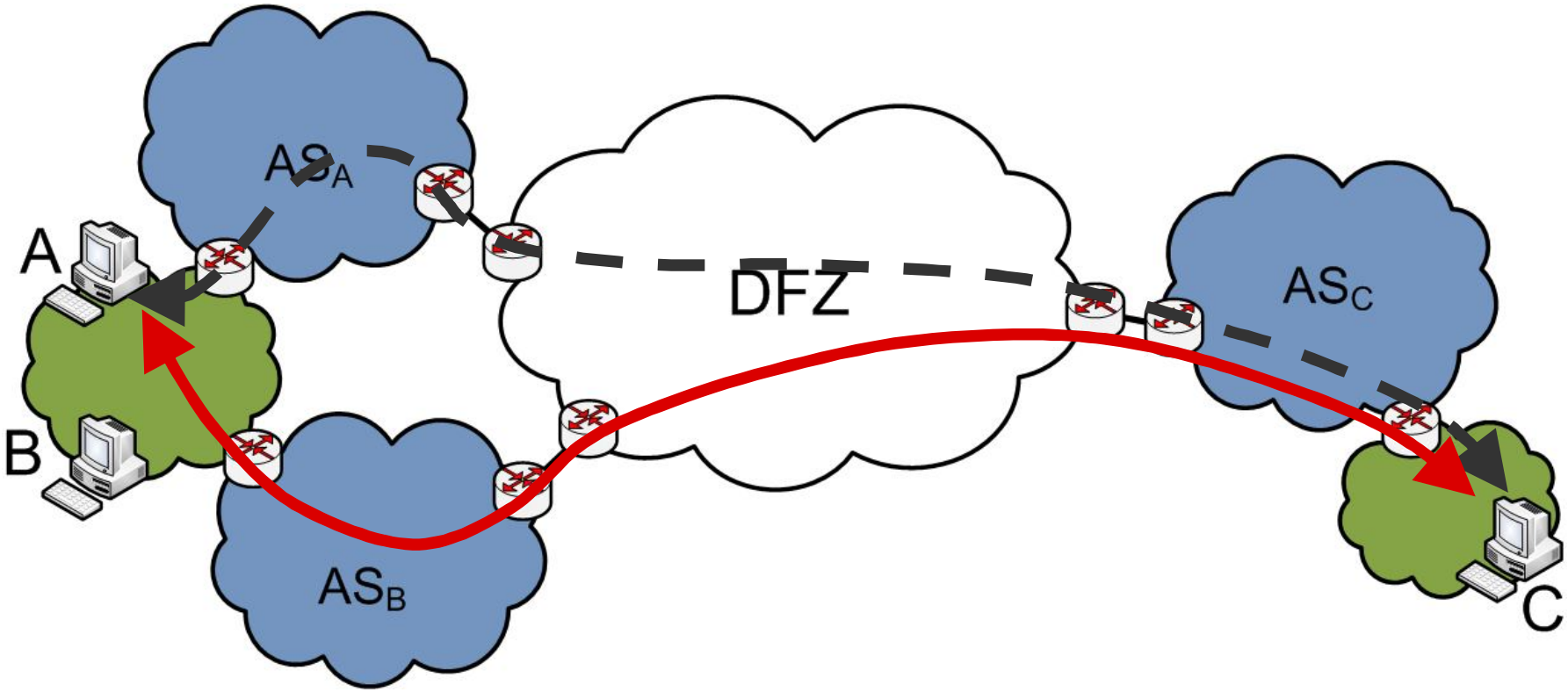
Muitas vezes envolvem configurações manuais de administradores (especialmente o BGP)

Caminhos Programáveis

- Concessão de maiores poderes aos usuários
  - Usuários podem escolher os próprios caminhos
    - Baseados em requisitos dos usuários ou das aplicações
  - Agentes inteligentes podem escolher autonomamente os melhores caminhos
    - Escolha realizada dinamicamente
- Consideração de métrica de interesse dos usuários
  - Além das métricas dos ISPs e acordos comerciais

Caminhos Programáveis

GTA / UFRJ



Caminho escolhido pelo ISP de A por padrão

Desafios dos Caminhos Programáveis

- Modelo da Internet é baseado no “melhor esforço”
  - Para tornar possível a programação de caminhos:
    - Internet deve dar suporte a qualidade de serviço
    - Internet deve dar suporte a escolhas contrárias a acordos comerciais entre ISPs
- Modelo da Internet é baseado na inteligência nas bordas
  - Fator positivo a programação de caminhos
  - Entretanto...
    - Agentes inseridos no interior da rede vão contra essa premissa

Novo Modelo de Negócios

- Liberdade de escolha de caminhos pode incentivar disputa
  - Redução dos custos de acesso
    - Serviços não oferecidos são consequência da falta de disputa?
  - Oferta de serviços diferenciados pelos ISPs
    - Escolha de caminhos mais apropriados força a competição
    - Como consequência...
      - ISPs que não oferecem os mesmos serviços perdem clientes
  - Caso nenhum ISP tome iniciativa
    - Incentivos podem ser oferecidos

Liberdade de Escolha aos Usuários

- Como diria um célebre personagem...

“Com grandes poderes vêm grandes responsabilidades”,
Tio Ben – Homem Aranha

- Liberdade de escolha para os usuários pode levar ao:
  - Aumento da complexidade que cada usuário deve lidar
    - Ex.: os usuários ou agentes precisam de conhecimento global
  - Maior número de caminhos conhecidos por cada usuário
    - Quanto mais caminhos, maiores são as opções

A liberdade de escolha pode levar a falhas na rede e problemas de escalabilidade

Suporte a Aumento Acelerado da Internet

- Recente relatório do IAB (*Internet Architecture Board*)
  - A escalabilidade é um dos desafios mais críticos em curto prazo para a Internet do Futuro
- Roteadores são equipamentos limitados em memória e processamento
  - Logo...
    - O aumento indefinido das FIBs e das RIBs afeta o desempenho do encaminhamento de pacotes
      - Busca nas FIBs pode ser custosa computacionalmente

Suporte a Aumento Acelerado da Internet

- Ao receber um pacote, cada roteador dispõe de poucos instantes para:
  - Armazenar o pacote
  - Selecionar a interface de saída baseado no endereço de destino
  - Encaminhar o pacote para interface correspondente

Dados do CIDR (*Classless Inter-Domain Routing*) mostram que a razão entre as redes que que sofreram agregação de prefixos e o total de redes na Internet é de apenas 38,4%

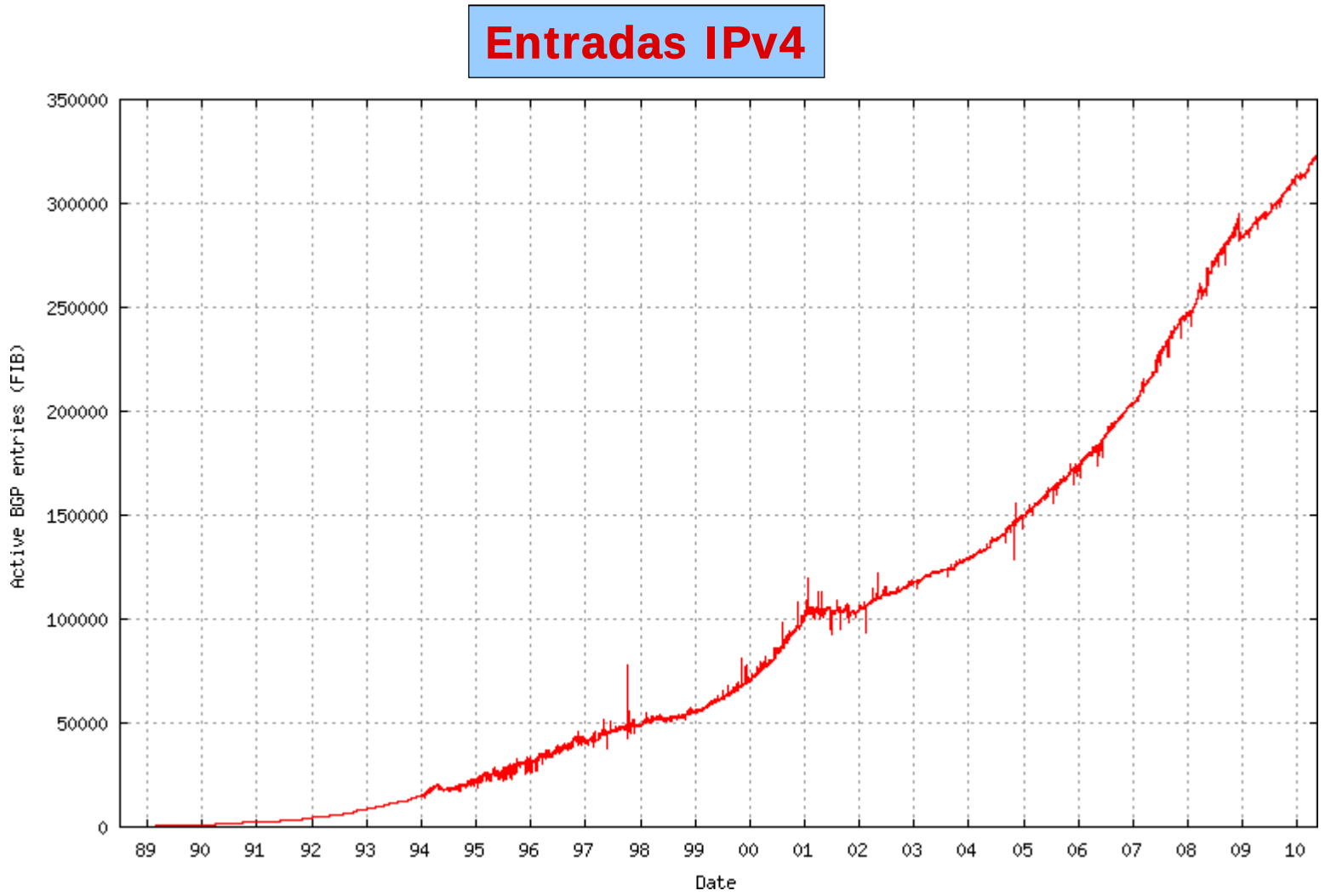
Suporte a Aumento Acelerado da Internet

- Além das limitações dos recursos de *hardware*...
  - A sobrecarga de controle gerada ao aumentar o número de estações pode ser relevante
    - Banda passante disponível pode se tornar insuficiente

Dados do CIDR (*Classless Inter-Domain Routing*) mostram que desde o início da década de 90 o número de entradas BGP ativas nas FIBs aumentou de algumas unidades para aprox. 310 mil

Número de Entradas Ativas IPv4 nas Tabelas BGP

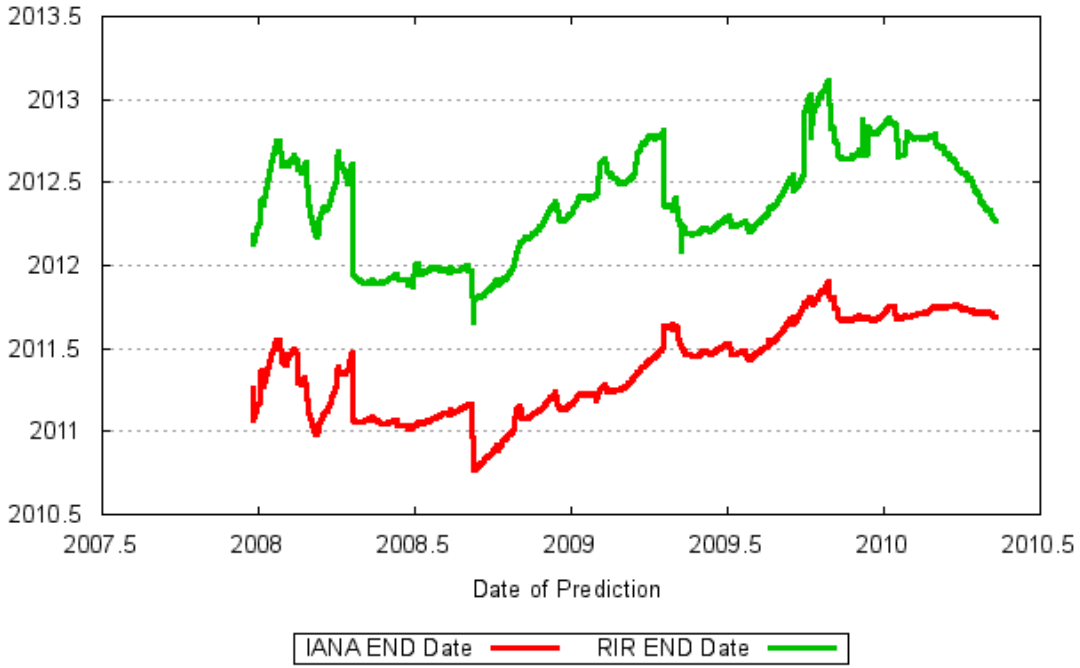
GTA / UFRJ



Desafios Ligados à Escalabilidade

GTA / UFRJ

- Esgotamento dos endereços IPv4
  - Endereços IP continuam a ser alocados
    - Exaustão de endereços IPv4 ocorrerá em aprox. 2 anos



Desafios Ligados à Escalabilidade

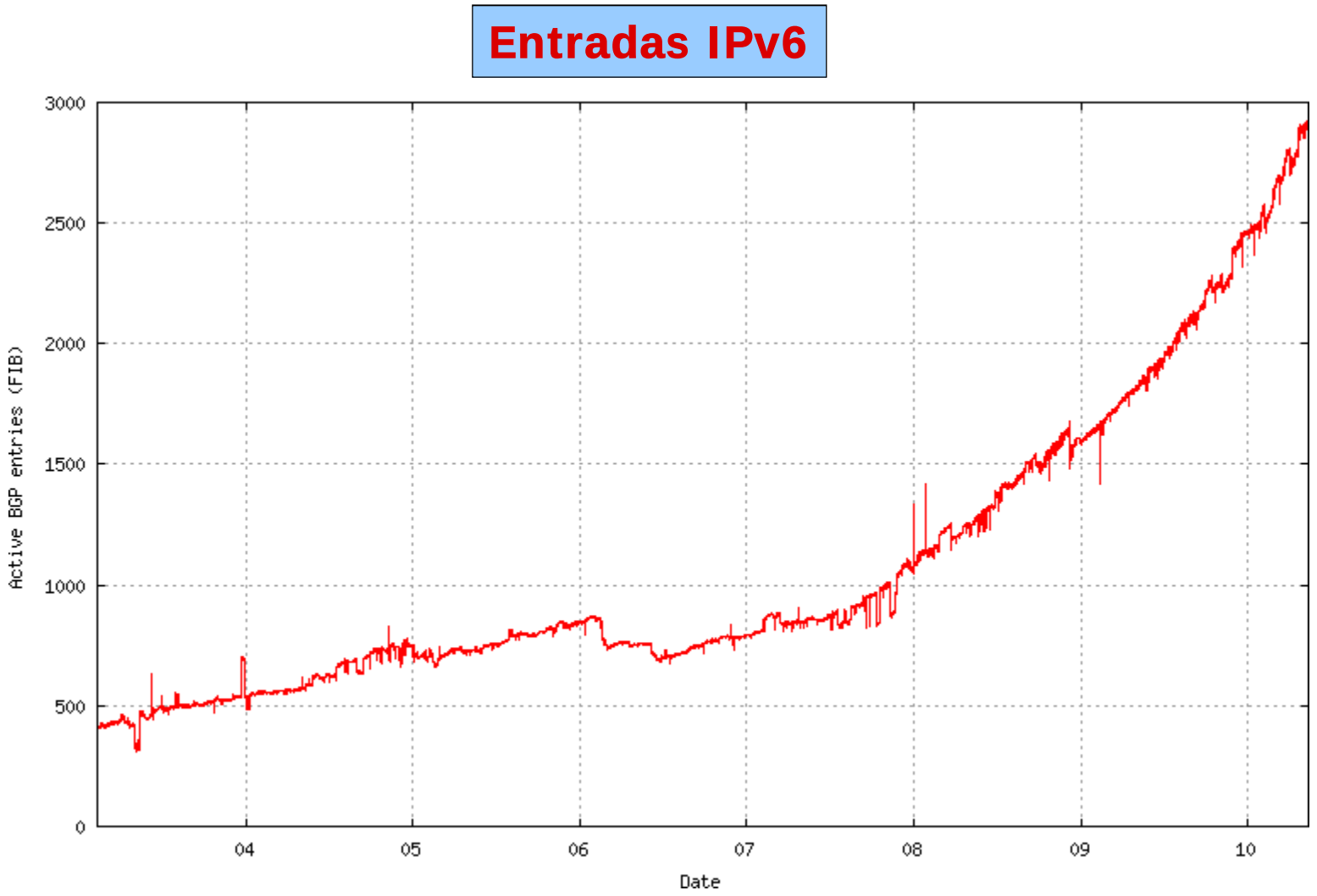
- O IPv6 resolve o problema da exaustão de endereços?
  - **SIM!**
  - **Entretanto...**
    - Uso do IPv6 aumenta a oferta de endereços
      - Mais estações e redes demandam endereços

Aumento da carga de controle e maior número de entradas nas tabelas de roteamento

- Problema da exaustão seria apenas adiado?
  - Número de entradas ativas nas FIBs continua crescendo exponencialmente

Número de Entradas Ativas IPv6 nas Tabelas BGP

GTA / UFRJ



Escalabilidade das Demandas Emergentes

- Menor impacto se...
  - Projeto original da Internet fosse seguido
    - Organização hierárquica e agregação de endereços
- Entretanto...
  - Demandas emergentes vão na direção oposta

- Suporte a redes multidomiciliadas
- Suporte a múltiplos caminhos

→ **Impedem a agregação de endereços**

- Suporte a mobilidade
- Programação de roteadores

→ **Aumentam a carga de controle**

Novas Propostas

- Quais são as novas propostas para lidar com os desafios da Internet do Futuro?
  - Problemas podem ser atacados de maneira isolada ou em conjunto
    - **Soluções isoladas são mais simples**
      - Podem possuir efeitos colaterais indesejáveis
    - **Soluções em conjunto são mais complexas**
      - Podem nunca existir...

Roteiro

- Introdução
- Arquitetura atual da Internet
- Desafios em Interconexão de Redes
- **Propostas para a Interconexão de Redes**
- Resultados Experimentais
- Considerações Finais

Propostas para a Interconexão de Redes

- Rompem com a arquitetura original da Internet
- Levam em conta período de transição para implementação

- Propostas:
  - Separação de localização e identificação
  - Roteamento plano
  - Mobilidade de rede
  - Múltiplos caminhos
  - Escalabilidade da Internet
  - Caminhos programáveis
  - OpenFlow e a solução comutada

Separação de Localização e Identificação

- Quebra a “semântica sobrecarregada” do IP
  - Considerada como fundamental para a Internet do Futuro
- Principais objetivos:
  - Combater problemas decorrentes dos múltiplos domicílios
    - Reduz problemas de escalabilidade
  - Combater problemas decorrentes da mobilidade
    - Permite que os nós móveis mantenham conexão

Chamada também como “*Loc/ID split*”

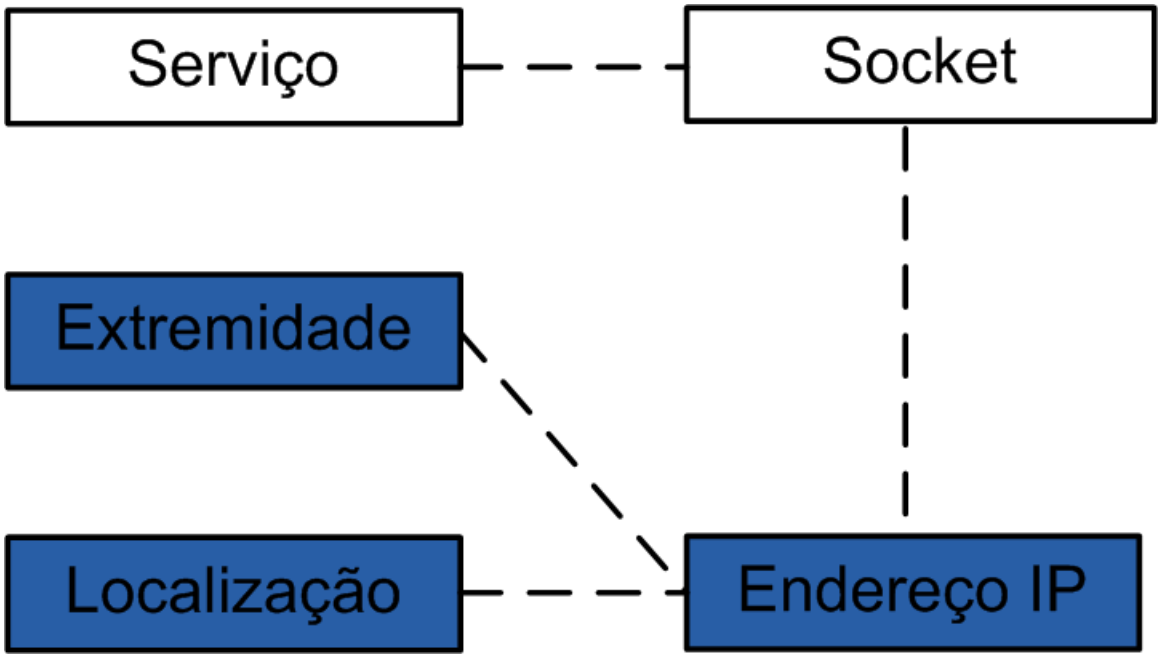
Separação de Localização e Identificação

- Manutenção de conexões com **identificador invariável**
  - Não varia mesmo com a mudança da localização da estação
- Procedimento semelhante ao DNS
  - Separa o nome de um sítio da Internet do seu endereço IP
    - `www.gta.ufrj.br` ➔ `146.164.69.2`
- Entretanto, assim como no caso do DNS
  - É necessário algum **sistema de mapeamento** para **associar identificador e localizador**
    - O mapeamento dinâmico e escalável entre identificador e localizador é um novo desafio...

Separação de Localização e Identificação

GTA / UFRJ

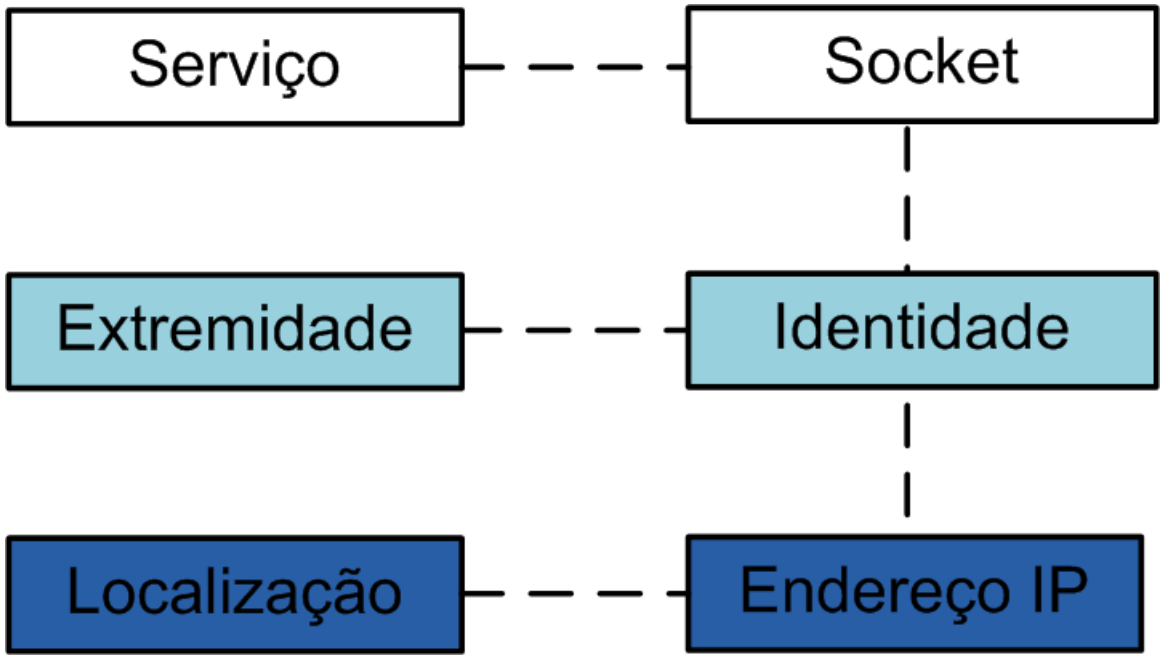
Modelo atual da Internet



Separação de Localização e Identificação

GTA / UFRJ

Separação de identificação e localização



i3 (*Internet Indirection Infrastructure*)

- Endereçamento na Internet utiliza comumente **indireção**
  - Exs.: IP móvel utiliza endereços de agentes
    Multicast utiliza endereços de grupo

Em ambos os casos o endereço de destino não é o endereço da estação final

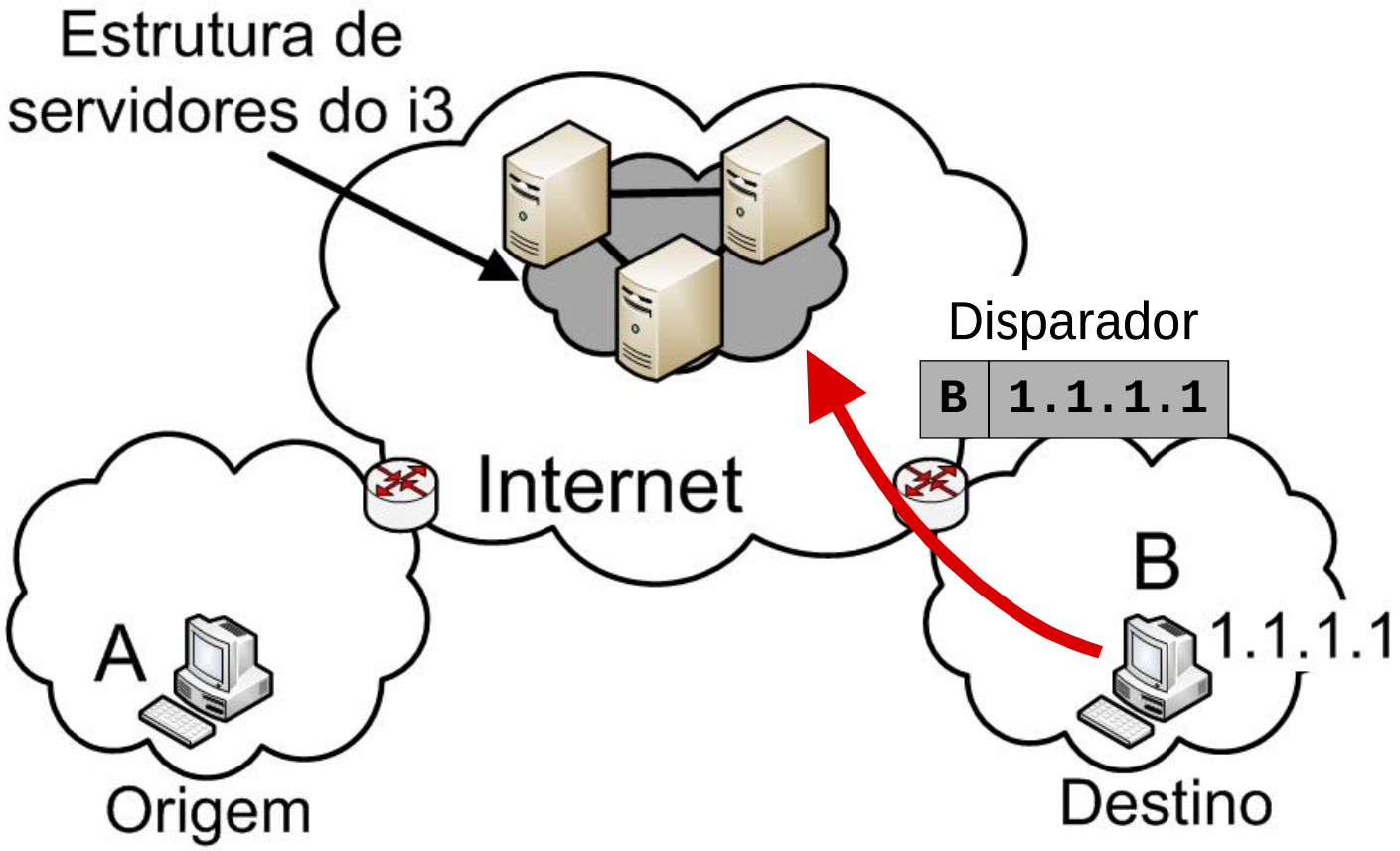
- i3 utiliza essa constatação
  - Propõe estrutura sobrecamada
    - Oferece suporte a qualquer serviço que empregue indireção

i3 (*Internet Indirection Infrastructure*)

- Modelo de serviço do i3
  - Desassocia o ato de enviar do ato de receber pacotes
- Pacotes são enviados de maneira indireta
  - Intermediado por um conjunto de servidores
    - Servidores mapeiam o identificador no endereço do destino
  - Mapeamento é orientado a destino
    - Destinos enviam o endereço atual e identificador aos servidores
      - Envio de disparadores (*triggers*)

Envio de Disparadores no i3

GTA / UFRJ

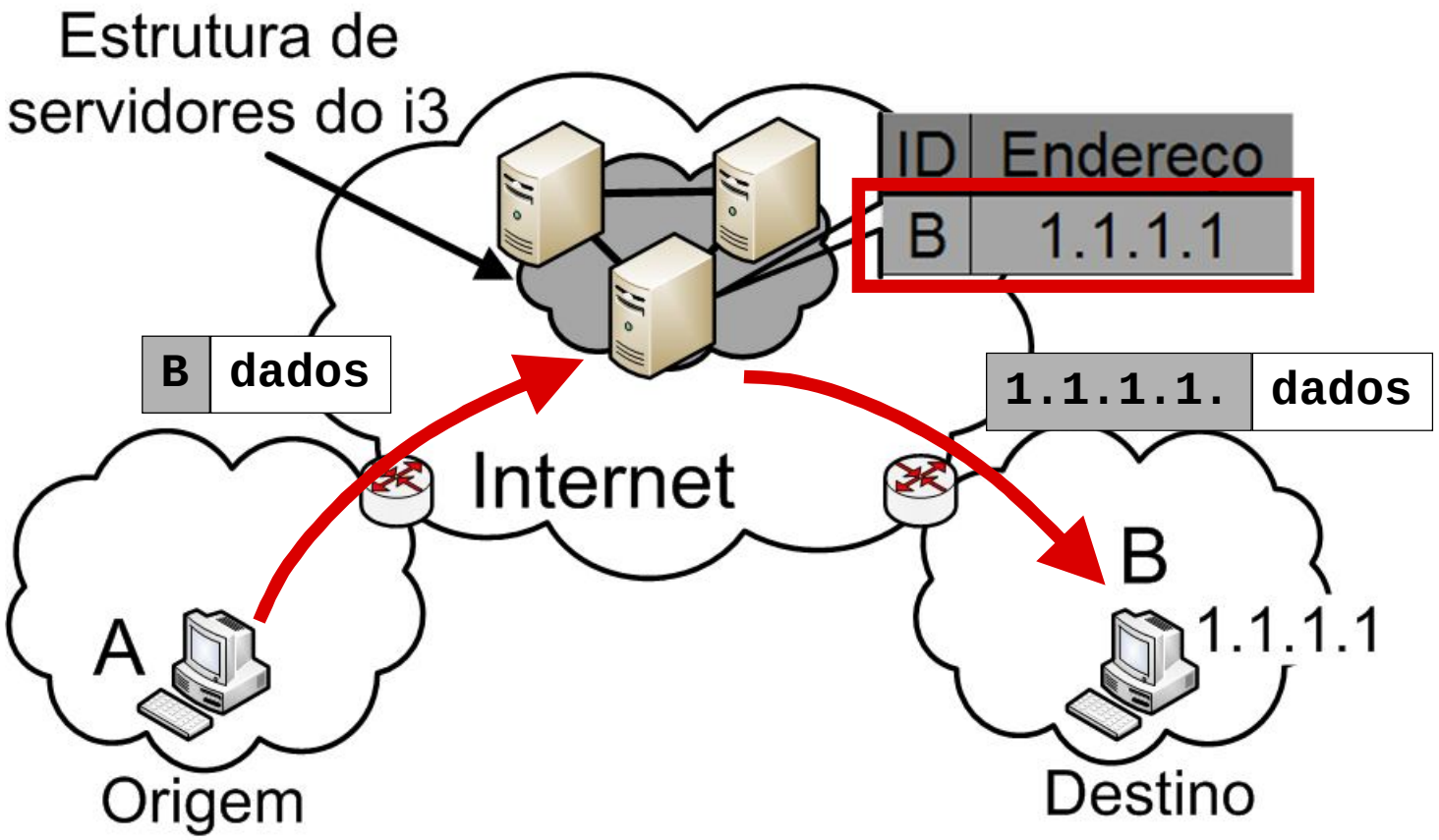


Mapeamento no i3

- Servidores mantêm o mapeamento de identificadores
  - Cada servidor é responsável por alguns mapeamentos
    - Pacotes são encaminhado para o servidor responsável
      - Após o mapeamento, o servidor encaminha o pacote para o endereço do destino correspondente
- Mapeamento é mantido de maneira volátil
  - Periodicamente os destinos devem atualizar o seu mapeamento na estrutura de servidores

Encaminhamento de Pacotes no i3

GTA / UFRJ



Mapeamento e encaminhamento

Múltiplos Destinos no i3

- Indireção do i3 desassocia as fontes dos destinos
  - Fontes não precisam conhecer:
    - Nem o número, nem tampouco os endereços dos destinos
  - Da mesma maneira, destinos não precisam conhecer:
    - Nem o número de fontes, nem tampouco os endereços
- Identificador pode ser associado a mais de um endereço de destino
  - Mapeamento é feito baseado em uma parte do identificador
    - Mantido na estrutura de servidores do i3

Nós Móveis no i3

GTA / UFRJ

- Conexão baseada em identificadores
  - Conexão utiliza identificadores ao invés de endereços físicos
    - Nó móvel ao mudar de rede de acesso, muda de endereço
    - Logo, o mapeamento na estrutura i3 deve ser atualizado

Uma vez que a conexão não é baseada em endereços, a conexão pode ser mantida

  - Mapeamento é atualizado sempre que o endereço muda
    - Pode implicar problemas de latência de atualização
    - Pode implicar aumento das tabelas de mapeamento
    - Pode implicar aumento dos caminhos seguidos pelos pacotes

LISP (*Locator/Id Split Protocol*)

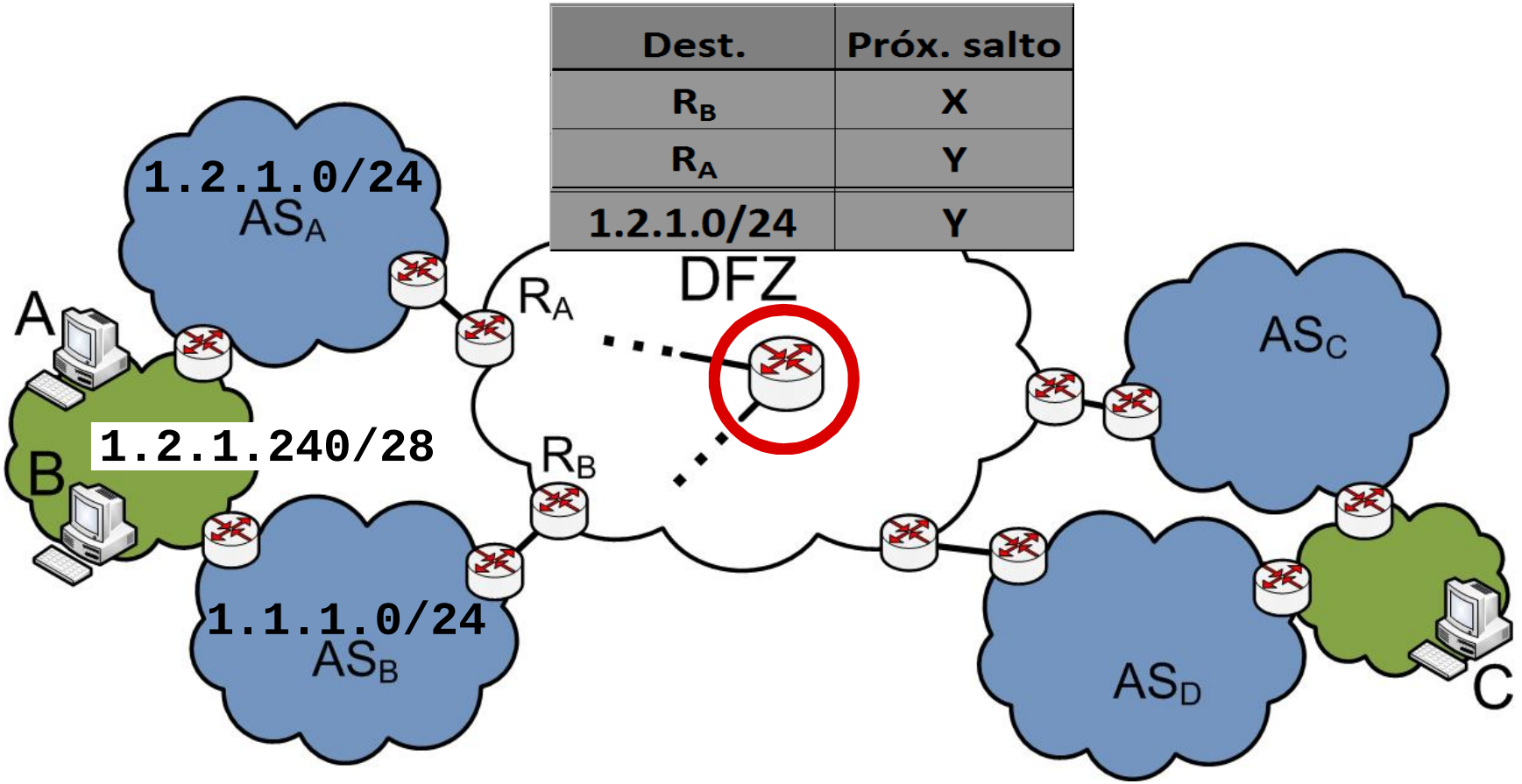
- Protocolo desenvolvido pela CISCO
  - Lida com os problemas dos múltiplos domicílios na Internet
  - Pode ser implementado de maneira gradual
- Endereçamento indireto semelhante ao i3
  - Divide o espaço de endereçamento em:
    - Espaço de endereçamento local
      - Composto pelas redes de borda da Internet
    - Espaço de endereçamento interdomínio
      - Composto pelos roteadores da DFZ

O objetivo é tornar o endereço das estações com significado apenas local

LISP (*Locator/Id Split Protocol*)

GTA / UFRJ

- Objetivo: Alcançar escalabilidade e flexibilidade de mudança de endereços locais



LISP (*Locator/Id Split Protocol*)

- Roteadores dos ASes de borda estão conectados à DFZ
  - Endereços chamados **Routing Locators (RLOCs)**
    - Endereços conhecidos por todos os roteadores interdomínio
- Estações da rede local
  - Endereços chamados **Endpoint IDentifiers (EIDs)**
    - Endereços com escopo limitado à rede de acesso

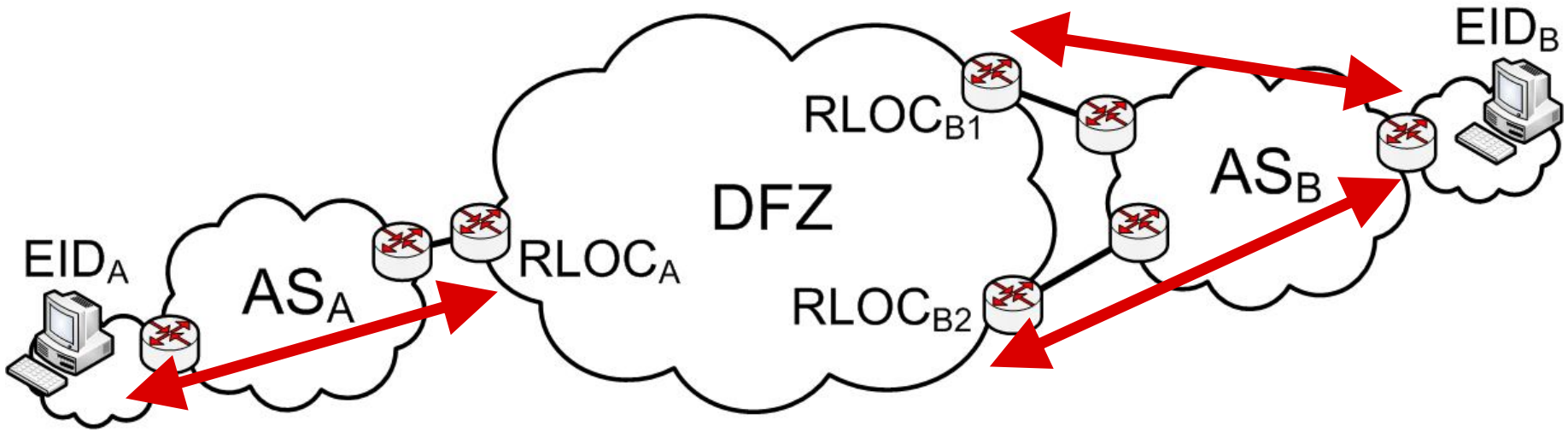
Endereços das estações não são conhecidos por roteadores interdomínio e os RLOCs não podem identificar estações

Endereçamento no LISP

- Dois tipos de endereços: **EIDs** e **RLOCs**
  - EIDs de uma rede local são associados a RLOCs de ISPs
    - ISPs pelos quais as estações possuem acesso à Internet
  - Um EID pode estar associado a mais de um RLOC
    - Múltiplos domicílios
  - Um RLOC pode estar associado a um prefixo de endereços locais

Endereçamento no LISP

GTA / UFRJ



EID$_B$ está associado ao RLOC$_{B1}$ e RLOC$_{B2}$

Encaminhamento de Pacotes no LISP

- Pacotes encaminhados na DFZ utilizam RLOCs
  - Tanto como endereços de origem quanto de destino
    - Endereços locais não são conhecidos na DFZ
  - Entretanto...
    - Endereços originais são usados entre a estações e os roteadores de borda de origem e destino

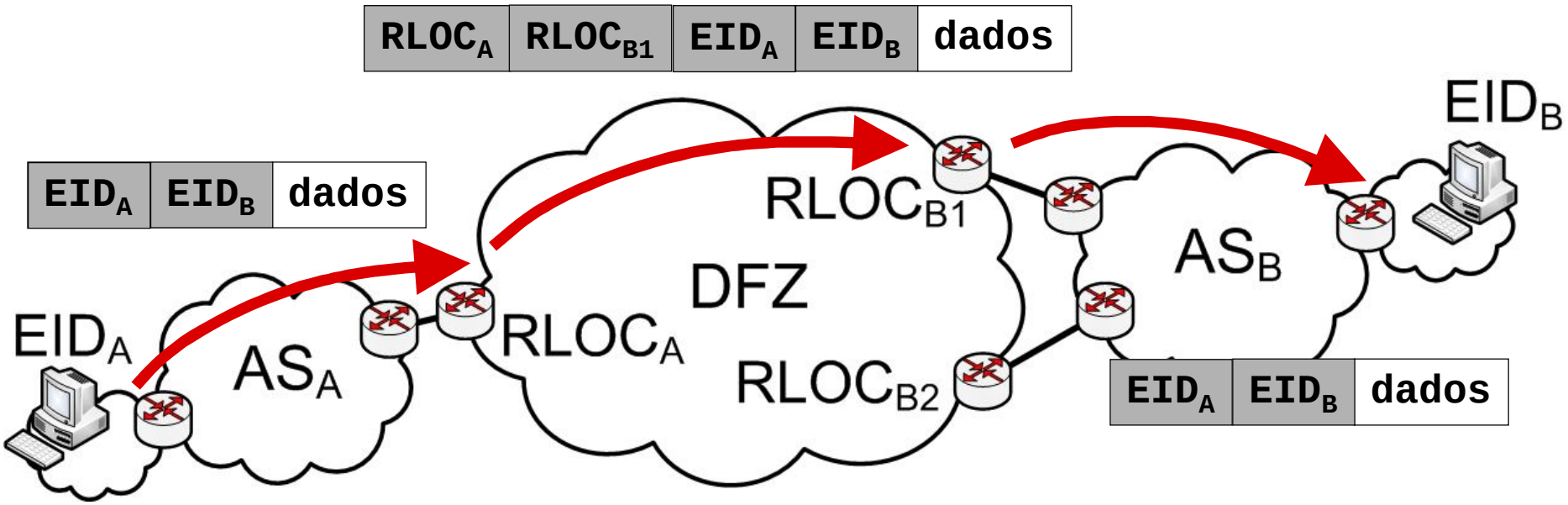
Endereços usados são os endereços locais de origem e destino

Encaminhamento de Pacotes no LISP

- Uso dos dois endereços requer procedimento especial
  - **Mapeamento e encapsulamento (*Map & Encap*)**
- Encaminhamento:
  - Mapeamento do endereço local no endereço do RLOC
  - Encapsulamento e tunelamento entre os roteadores da DFZ
    - Roteadores realizam *Map & Encap* já que são os únicos que conhecem a associação entre os EIDs e os RLOCs
  - RLOCs são remapeados nos endereços locais no roteador de borda do destino

Encaminhamento de Pacotes no LISP

GTA / UFRJ



Dados mapeados e encapsulados entre os RLOCs

Encaminhamento de Pacotes no LISP

- Estação de origem conhece:
  - **Identificador do destino e o seu próprio endereço**

Como o identificador do destino é mapeado no EID do destino pela estação de origem se os endereços não são globais?

- **Resolução do identificador do destino no EID**
  - Uso de um sistema de resolução de nomes
    - Ex.: DNS

Encaminhamento de Pacotes no LISP

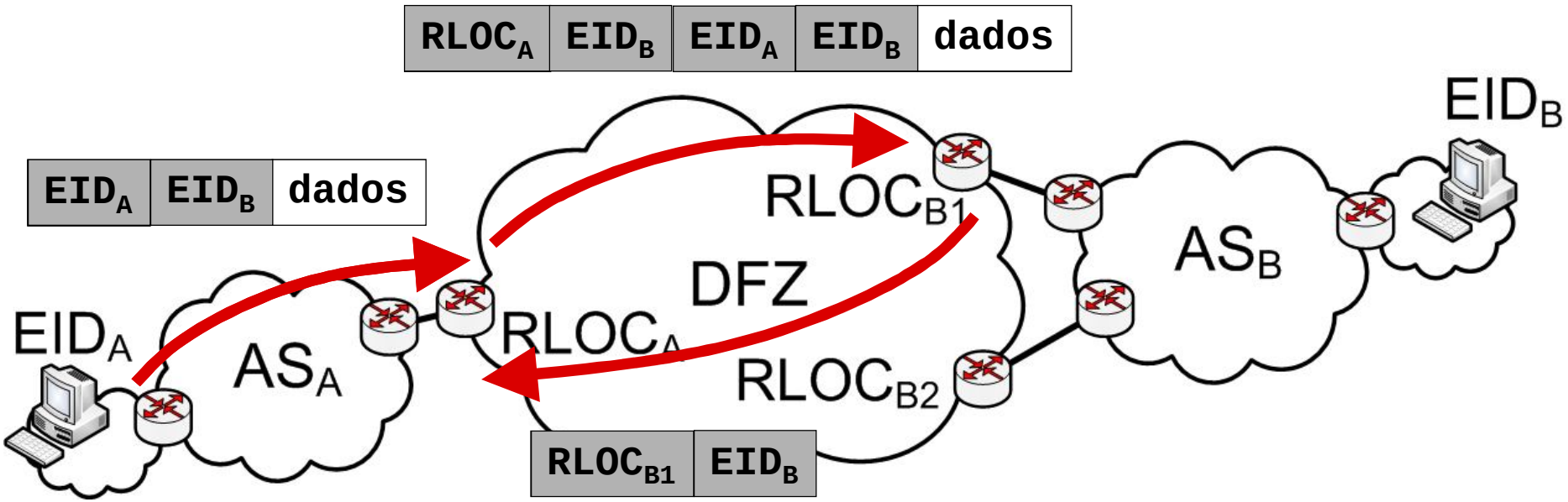
- Após a resolução dos endereços de origem e destino...
  - Pacotes são encaminhados pela estação de origem até o roteador de borda
    - Uso de uma rota *default*
  - Ao chegar no roteador de borda, esse deve descobrir o mapeamento do EID do destino no RLOC correspondente
    - Processo que depende da versão do LISP

Mapeamento no LISP

- As primeiras versões do LISP (LISP 1 e 1.5)
  - Assumem que o EID é roteável na Internet
    - Roteador de borda da origem encapsula o pacote
      - Endereço de origem → RLOC do próprio roteador de borda
      - Endereço de destino → EID da estação de destino
  - Pacote é encaminhado pela DFZ até o roteador de borda do destino
    - Roteador envia ***Map-Reply*** ao roteador de borda da origem
      - Informa o mapeamento

Mapeamento no LISP

GTA / UFRJ



Dados mapeados e encapsulados utilizando como endereço de destino o EID$_B$

Mapeamento no LISP

- Versões 2 e 3 não consideram EIDs roteáveis na Internet
  - Mapeamento EID/RLOC
    - Conhecido através do protocolo de distribuição de mapas (*Mapping Distribution Protocol*)
  - Realização de requisições explícitas (***Map-Request***)
    - Requisições a um serviço de mapeamento distribuído
      - LISPv2: Sistemas de DNS
      - LISPv3: Sistemas de DHTs (*Distributed Hash Table*)

Em ambos os casos, os sistemas respondem (*Map-Reply*) apenas às requisições recebidas

Mapeamento no LISP

- **Base de dados**
  - Seleciona o RLOC que é usado como endereço de origem
  - Decide se um pacote recebido da Internet deve ser desencapsulado

- **Memória cache**
  - Armazena os RLOCs das redes de acesso do destino
    - Mapeamento do EID no RLOC do destino são armazenados na cache
  - Utiliza protocolo de distribuição (*Mapping Distribution Protocol*)
    - Em caso de buscas mal-sucedidas a mapeamentos

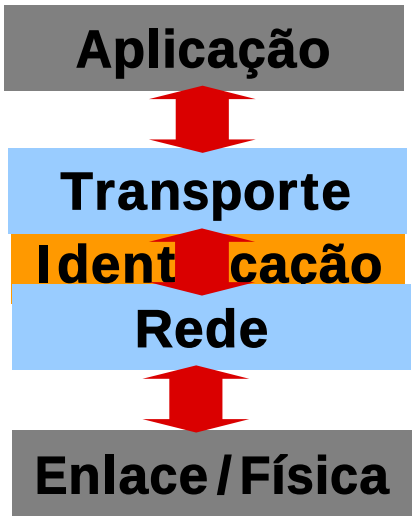
Vantagens do Mapeamento e Encaminhamento

- Funcionamento transparente aos nós da rede
  - Nós da rede não conhecem o encapsulamento realizado
- Separação da localização da identificação
  - Facilita o uso de estações multidomiciliadas
    - Desassocia o endereço da estação do endereço de seu ISP
    - Aumenta a escalabilidade do sistema
- Uso de estrutura de servidores é dispensada
  - Vantagem com relação ao i3

HIP (*Host Identity Protocol*)

GTA / UFRJ

- Insere uma nova camada entre rede e transporte
  - Camada de **identificação**
    - Camada de transporte interage com a camada de identificação
    - Camada de identificação interage com a camada de rede



HIP (*Host Identity Protocol*)

- Conceitos de **identidade** e **identificador** de um nó
  - Identidade se refere à entidade abstrata que é identificada
  - Identificador se refere ao padrão binário que é utilizado no processo de identificação
    - Ex.: identidade = nome de uma estação (`rio.gta.ufrj.br`)

identificador = chave pública criptográfica

- Chave pública como identificador
  - Qualquer tipo de identificador poderia ser usado

HIP (*Host Identity Protocol*)

- Uso de chave pública como identificador
  - Possibilita autenticar a origem dos pacotes recebidos
    - Evita a violação dos pacotes em trânsito
- Identificadores que não utilizam criptografia
  - Devem ser utilizados em ambientes considerados seguros

Identificadores e Rótulo

GTA / UFRJ

- Identidade de um nó no HIP → **Abstração**
- Identificador → **Representação binária**
  - Pode ser utilizado nas comunicações
    - Entretanto, tamanho e a variabilidade de tipos dificultam...
      - Emprego da saída de uma função *Hash*

Identificadores e Rótulo

- Rótulo de estação: HIT (*Host Identity Tag*)
  - Representação do identificador
    - Tamanho fixo
    - Formato independente dos algoritmos criptográficos empregados
  - Deve ser único globalmente

Estabelecimento de Conexão no HIP

- Processo de autenticação e troca de chaves
  - Antes da comunicação é realizada troca de base
    - **Protocolo executado entre estações finais**
  - Autenticação envolve a troca de desafios criptográficos

- Após a troca de base a associação HIP se torna ativa

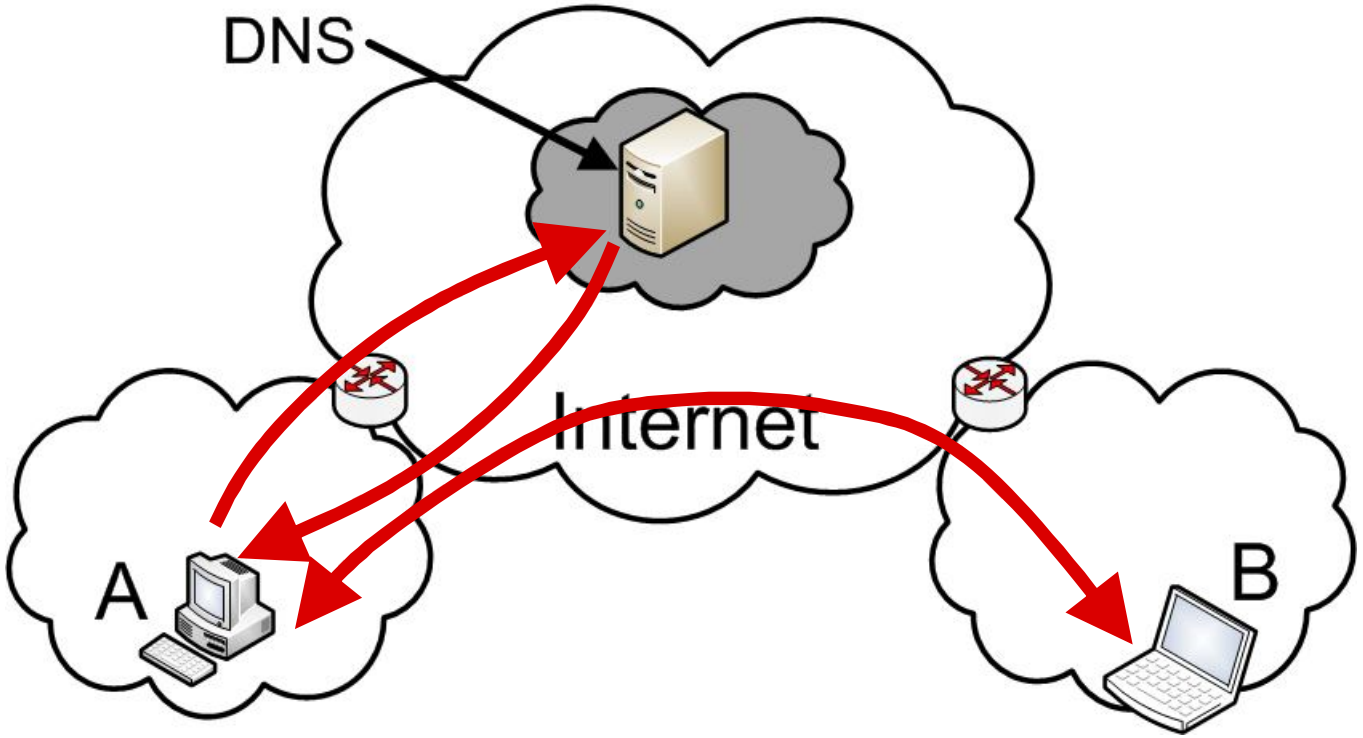
Todo o procedimento pode ser atualizado quando as chaves criptográficas expiram ou quando uma estação se desloca

Encaminhamento no HIP

- Camada de transporte estabelece conexões utilizando os HITs de origem e destino
  - Oferecidos pela camada de identificação introduzida pelo HIP
- Mas, encaminhamento na Internet requer endereços IP
  - Estação de origem substitui o HIT pelo endereço IP
    - Uso de um sistema de resolução de nomes
  - Resolução de nomes retorna outras informações do destino
    - HIT e chave pública
- Após a resolução de nomes...
  - Comunicação de dados inicia entre as estações

Encaminhamento no HIP

GTA / UFRJ



Comunicação é estabelecida

Encaminhamento no HIP

- Endereço de um nó é utilizado até o final da comunicação
  - Ou até que o nó de destino se desloque
    - Diferente do LISP que utiliza túneis
- No HIP, se uma estação se mover...
  - A própria estação avisa ao destino qual o seu novo endereço
- Entretanto, se uma nova estação desejar estabelecer uma conexão com a estação que se moveu...
  - A resolução do nome retorna o endereço IP antigo
    - Mapeamento no DNS pode não estar atualizado

Encaminhamento no HIP com Nós Móveis

- HIP usa servidores na Internet
  - Evita que as estações móveis precisem atualizar o DNS

HIP utiliza servidores estáticos chamados de *rendezvous* para auxiliar em um processo de encaminhamento indireto

- Nome da estação móvel é mapeado no endereço IP do *rendezvous*
  - *Rendezvous* possui atualizada a localização da estação móvel
    - É melhor atualizar o endereço IP no *rendezvous* que no DNS
  - Resolução do nome responde endereço IP do *rendezvous* e o HIT da estação móvel

Encaminhamento no HIP com Nós Móveis

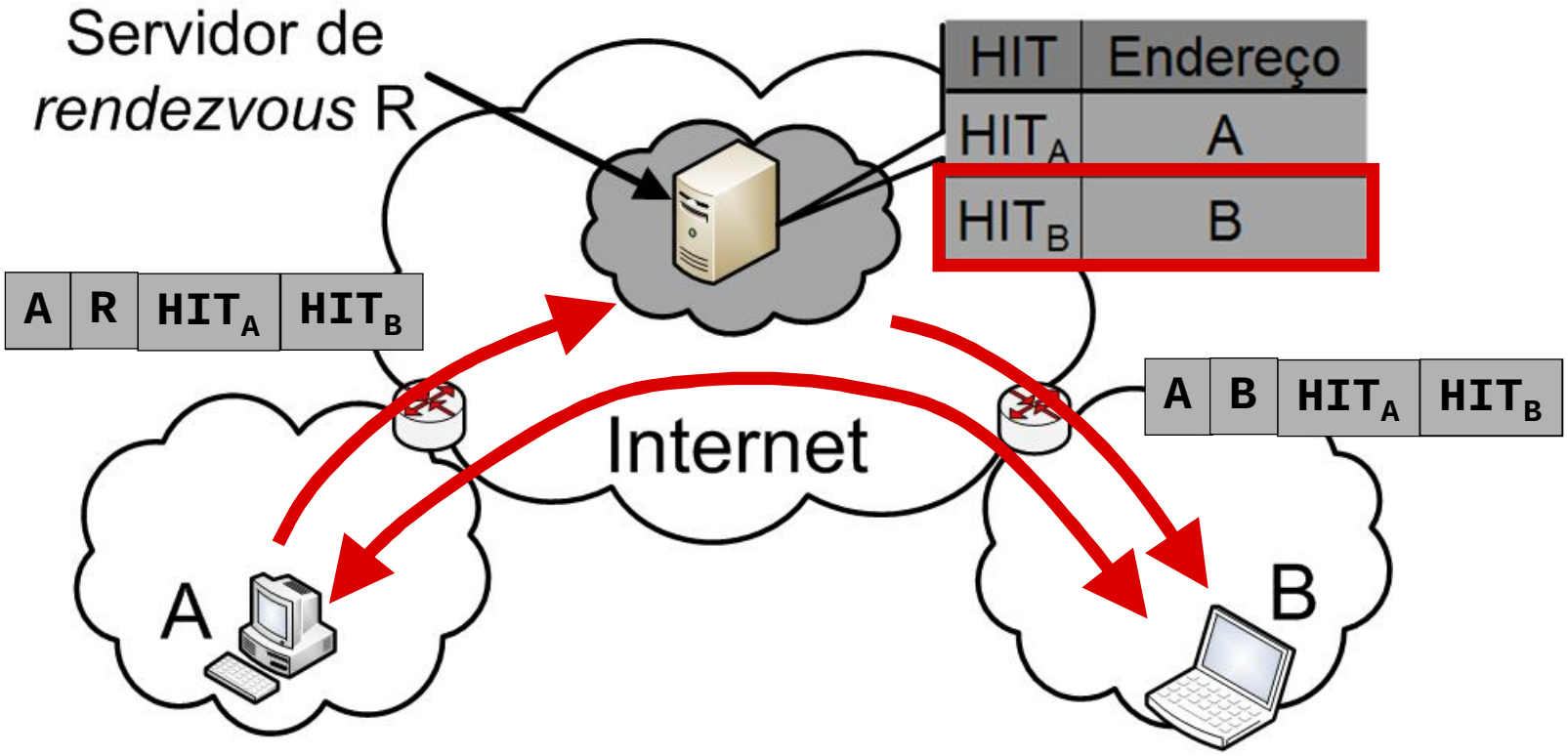
- Estação da Internet inicia o processo de autenticação e troca de chaves
  - Endereço IP e o HIT recebidos são usados
- Mensagem é encaminhada até o servidor *rendezvous*
  - Servidor verifica se o HIT da mensagem é um dos seus
  - Caso não seja, ele verifica se conhece o mapeamento
    - Se o mapeamento for conhecido → Mensagem encaminhada

Encaminhamento no HIP com Nós Móveis

- Estações que desejam utilizar um servidor de *rendezvous*
  - Devem se registrar nesses servidores
- Estação que recebe a primeira mensagem de autenticação e troca de chaves
  - Responde diretamente à estação de origem
    - Toda a comunicação passa a ser direta
    - Se a estação móvel mudar de rede novamente
      - Ela atualiza a outra estação e o servidor *rendezvous*

Encaminhamento no HIP com Nós Móveis

GTA / UFRJ



Resposta é enviada diretamente à estação de origem e a comunicação é realizada diretamente

Shim6

- Proposta para tolerar falhas de nós IPv6 multidomiciliados
  - Mantém comunicação mesmo se localizadores falharem
    - Conexões devem permanecer ativas mesmo em caso de falha
- Semelhante ao HIP, o Shim6 define um identificador
  - ULID (*Upper Layer IDentifier*)
- Diferente do HIP, o localizador é o próprio endereço IPv6

O endereço IPv6 cumpre o papel de identificador no primeiro contato

Shim6

GTA / UFRJ

- Diferente das propostas anteriores
  - Endereço IPv6 pode ser utilizado também como identificador
    - Cumpre o papel do ULID
      - Não há um novo espaço de identificação
  - Nesse caso, se o localizador mudar, o ULID permanece constante
    - Essa possibilidade é considerada pouco provável
      - Shim6 não foi desenvolvido para redes móveis

Shim6

- Nova camada entre transporte e rede é inserida
  - Aplicações acima da camada inserida utilizam os ULIDs
    - ULIDs foram mapeados a partir dos localizadores das estações de origem e destino
- Mapeamento por par de ULIDs é mantido
  - Todas as conexões com o mesmo par origem-destino compartilham o mesmo mapeamento
    - Protocolos de camadas superiores podem associar mais de um par de localizadores a um único par de ULIDs

Encaminhamento no Shim6

- Transmissões iniciam com as aplicações
  - Par de localizadores associados ao par de ULIDs é negociado entre origem e destino
    - Não há mapeamento: ULID ≡ Endereço da estação
- Múltiplos pares de localizadores são utilizados
  - Proteção contra falhas
    - Caso nenhum funcione, há teste de novos pares

Mapeamento em Sistemas de *Loc/ID Split*

- Podem ser classificados em PUSH ou PULL
  - **PUSH**: Mapeamento enviado aos roteadores sem requisições
    - Mapeamento mantido por elementos centralizadores
  - **PULL**: Mapeamento enviado através de requisições
    - Roteadores enviam requisições quando não conhecem um determinado mapeamento
      - Exs.: DNS ou DHTs

Mapeamento em Sistemas de *Loc/ID Split*

- **PUSH**:
  - Vantagem:
    - Menor atraso no mapeamento
  - Desvantagem:
    - Maior carga de controle

X

- **PULL**:
  - Vantagem:
    - Menor carga de controle
  - Desvantagem:
    - Maior atraso no mapeamento

Soluções híbridas → Misturam soluções PUSH em um subconjunto de servidores e soluções PULL para os demais

Roteamento Plano

- Aborda problema da “semântica sobrecarregada” do IP
  - Diferente do *Loc/ID Split*...
    - Roteamento baseado apenas no identificador dos nós
      - Unicidade do identificador é requisito
      - Maior nível de abstração

Roteamento plano remove o conceito de localização e a relação com a topologia da rede

Principais Vantagens do Roteamento Plano

- Independe da topologia
  - Propício para conexões envolvendo nós móveis
- Dispensa resolução de nomes
  - Infraestrutura não é mais necessária

- Entretanto, ainda enfrenta problemas de escalabilidade
  - Dificuldades para estruturar os identificadores
  - Dificuldades para encontrar caminhos mais curtos

As vantagens possíveis tornam o estudo dessa proposta atraente

ROFL (*Routing On Flat Labels*)

- Uso de rótulos para identificações dos nós
  - Desassocia identificação da localização na rede
- Operação baseada nas DHTs (*Distributed Hash Table*)
  - Distribui homogeneamente carga ou funcionalidades
    - Utilizada frequentemente em redes par-a-par (P2P)
  - Evita estruturas com hierarquia
    - Ideal para roteamento plano

ROFL (*Routing On Flat Labels*)

- ROFL deve funcionar tanto intra quanto interdomínio
  - Intradomínio
    - Baseado no Chord
  - Interdomínio
    - Baseado no Canon

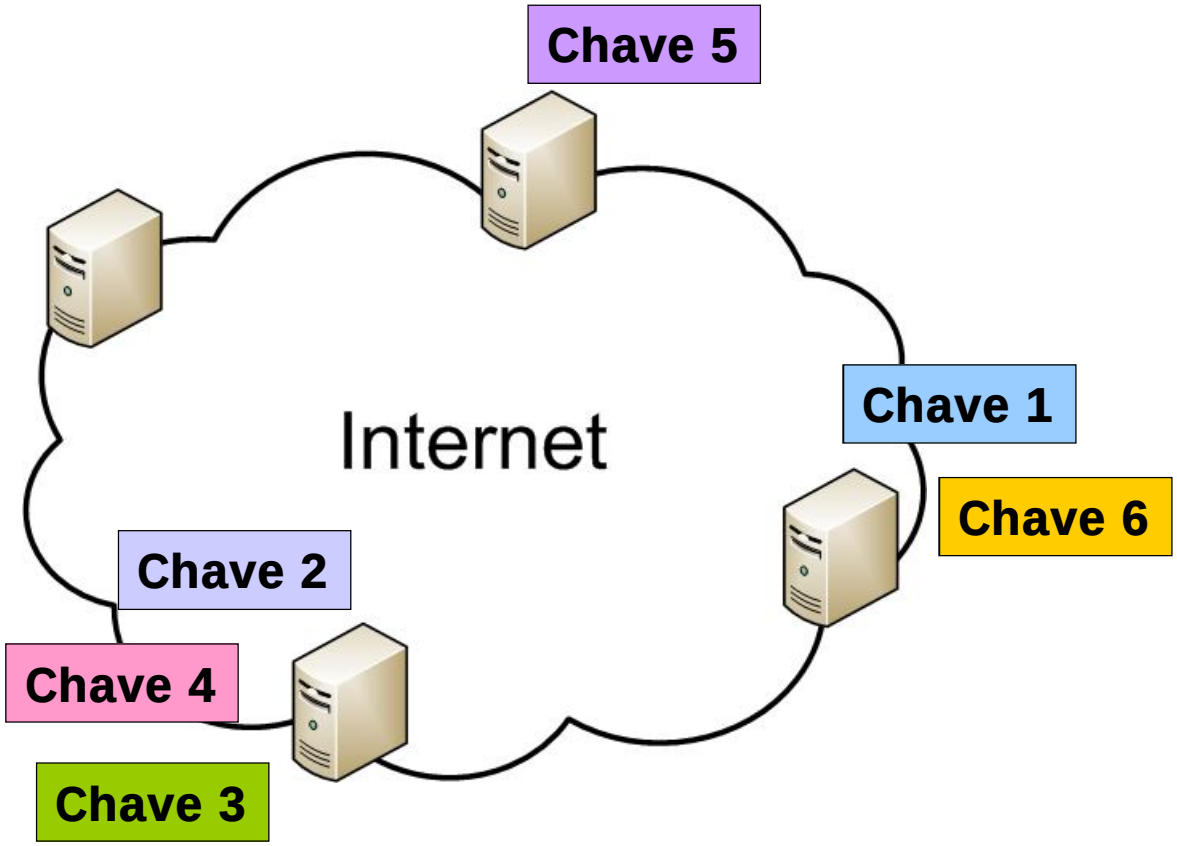
Tanto o Chord quanto o Canon são sistemas de distribuição baseados em DHTs

Chord

- Proposto para busca de conteúdo em redes par-a-par
- Dados são associados a uma chave
  - Escolhida em função do identificador da camada de aplicação
    - Ex.: nome de um arquivo
- Camada de rede
  - Chaves são associadas a um identificador
  - Nós são associados a um identificador (ID)
    - Ambos os identificadores são obtidos com funções *Hash*
  - Identificadores de chave são mapeados em um ID de nó
    - Cada nó fica responsável por uma ou mais chaves

Chord

GTA / UFRJ

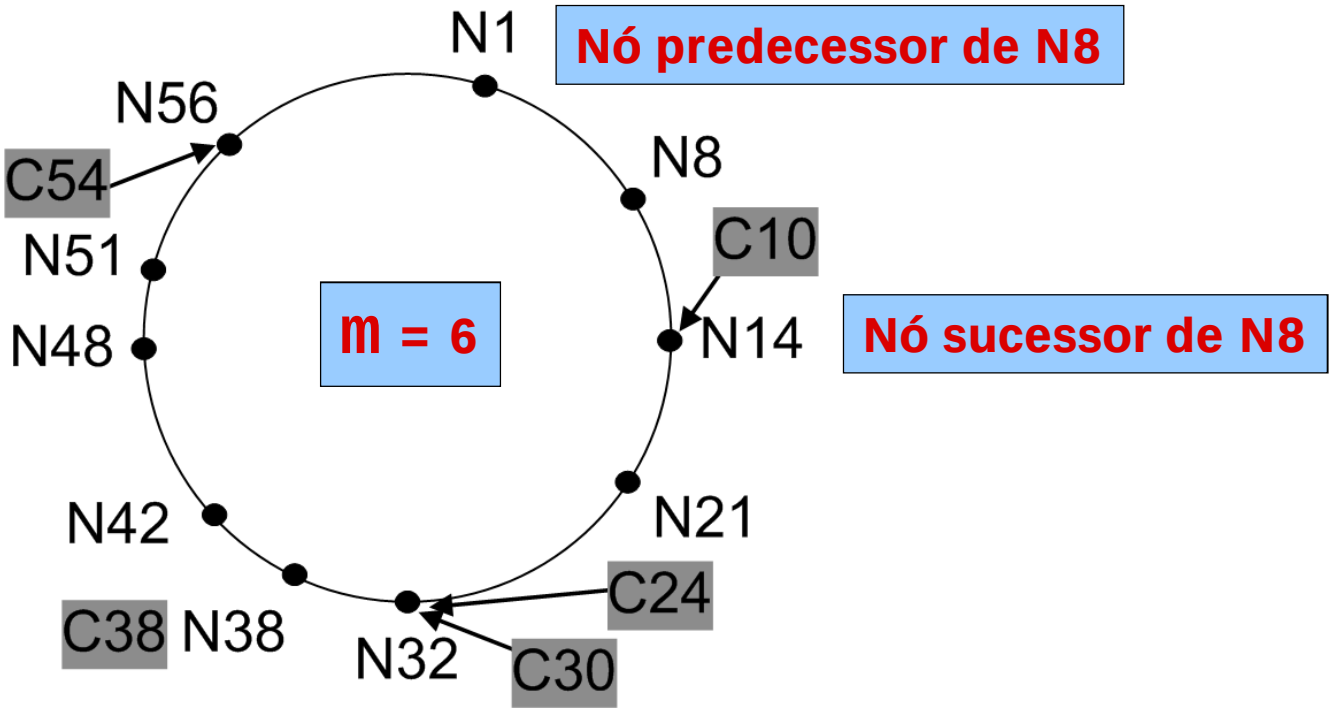


Nós que possuem as chaves associadas armazenam o conteúdo associado às chaves

Mapeamento das Chaves e dos Nós no Chord

GTA / UFRJ

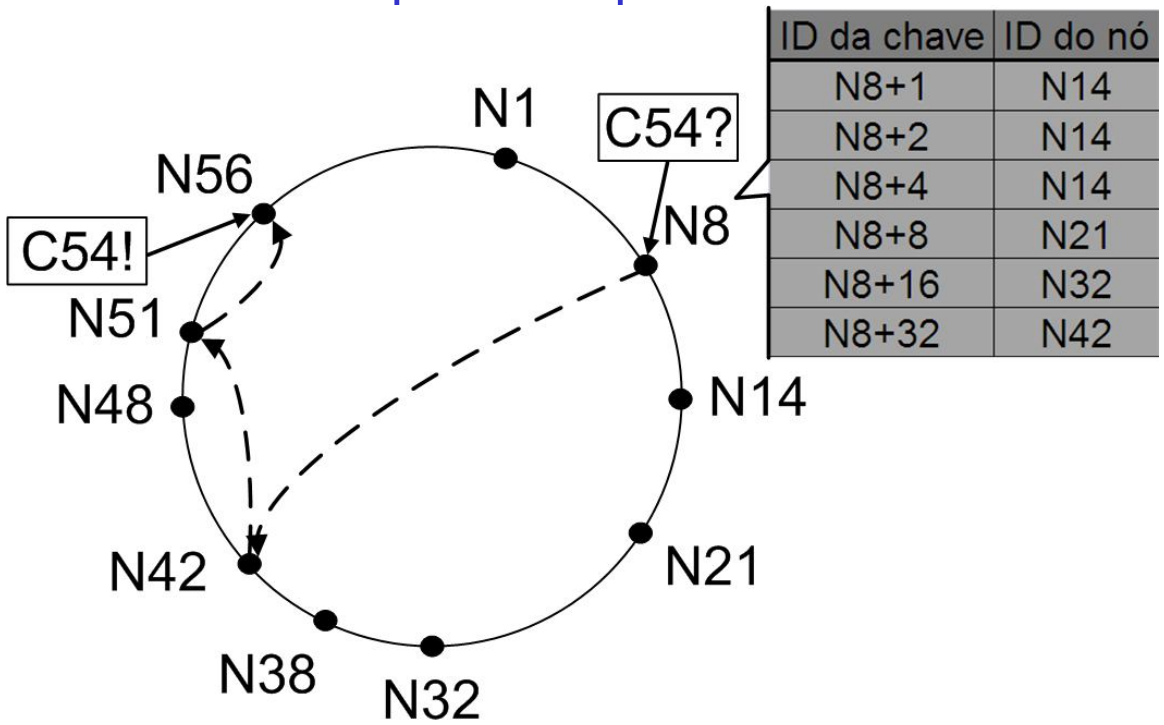
- Realizado em um espaço de identificação circular
  - Módulo 2^m, onde m é o tamanho do identificador em bits
    - Chave é mapeada no primeiro nó com ID maior ou igual



Busca de Conteúdo no Chord

GTA / UFRJ

- Busca no espaço circular
  - Uso de tabela auxiliar com **m** linhas
    - Cada linha é composta pelo identificador da chave e pelo identificador do nó responsável pela chave



ID da chave	ID do nó
N8+1	N14
N8+2	N14
N8+4	N14
N8+8	N21
N8+16	N32
N8+32	N42

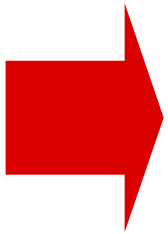
Espaço de Identificação Circular + Tabela de Roteamento

- Melhora problema de escalabilidade
  - Organização pode ser aplicada à Internet
    - Identificador deve ser único
- Identificador deve permanece inalterado
  - Independente da localização
    - Manutenção das conexões

Embora o uso do espaço de identificação circular + tabela de roteamento melhore a escalabilidade, sistemas escaláveis possuem normalmente hierarquia

Canon

- Introduz hierarquia em sistemas baseados em DHTs
  - Mantém características como distribuição de carga



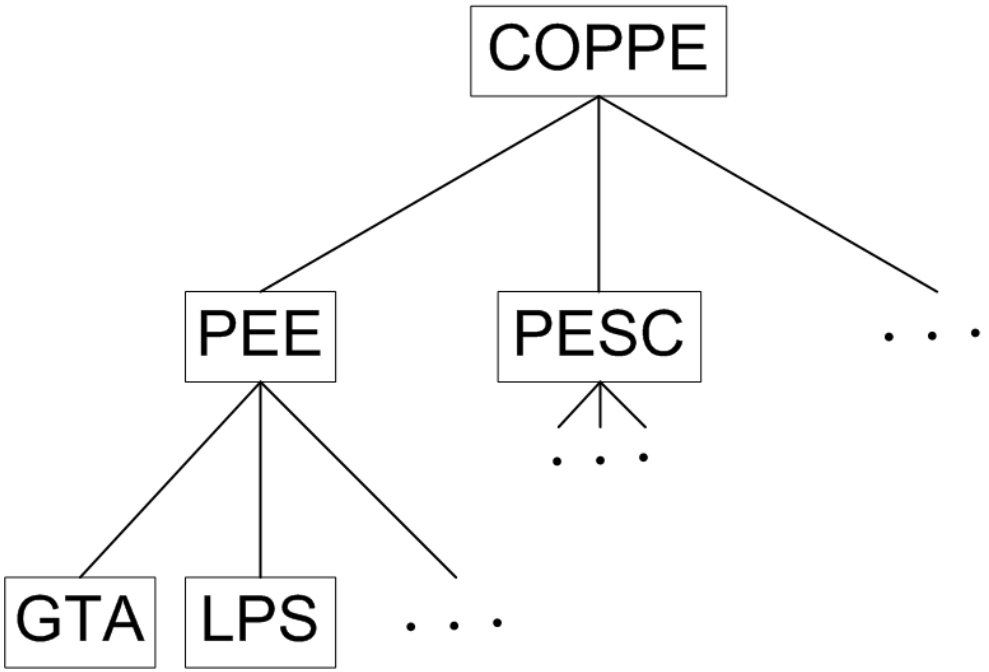
O objetivo é construir um sistema híbrido para reunir as principais vantagens das DHTs e dos sistemas com estruturas hierárquicas

  - Adapta mais suavemente à realidade da Internet
    - Organizada de maneira hierárquica e dividida em diferentes ASes

Estrutura Hierárquica

GTA / UFRJ

- Semelhante a uma árvore

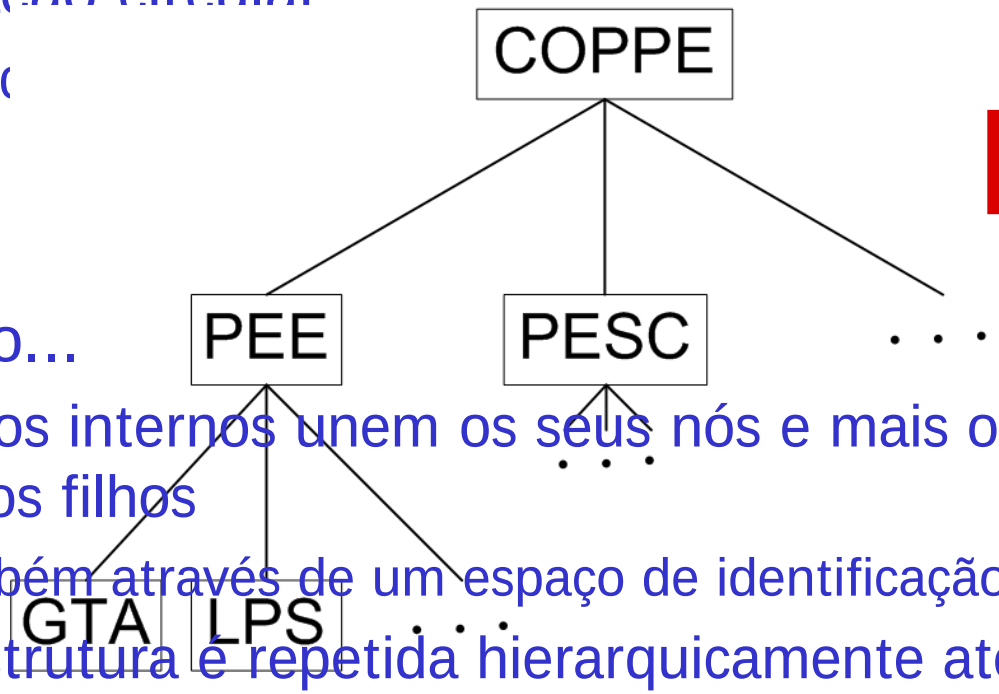


Como considerar a estrutura hierárquica e manter as propriedades de distribuição das DHTs?

Estrutura Hierárquica

GTA / UFRJ

- Cada domínio folha define um espaço de identificação circular
  - Assim (



- Entretanto...
  - Domínios internos unem os seus nós e mais os nós dos seus domínios filhos
    - Também através de um espaço de identificação circular
  - Essa estrutura é repetida hierarquicamente até alcançar o domínio raiz

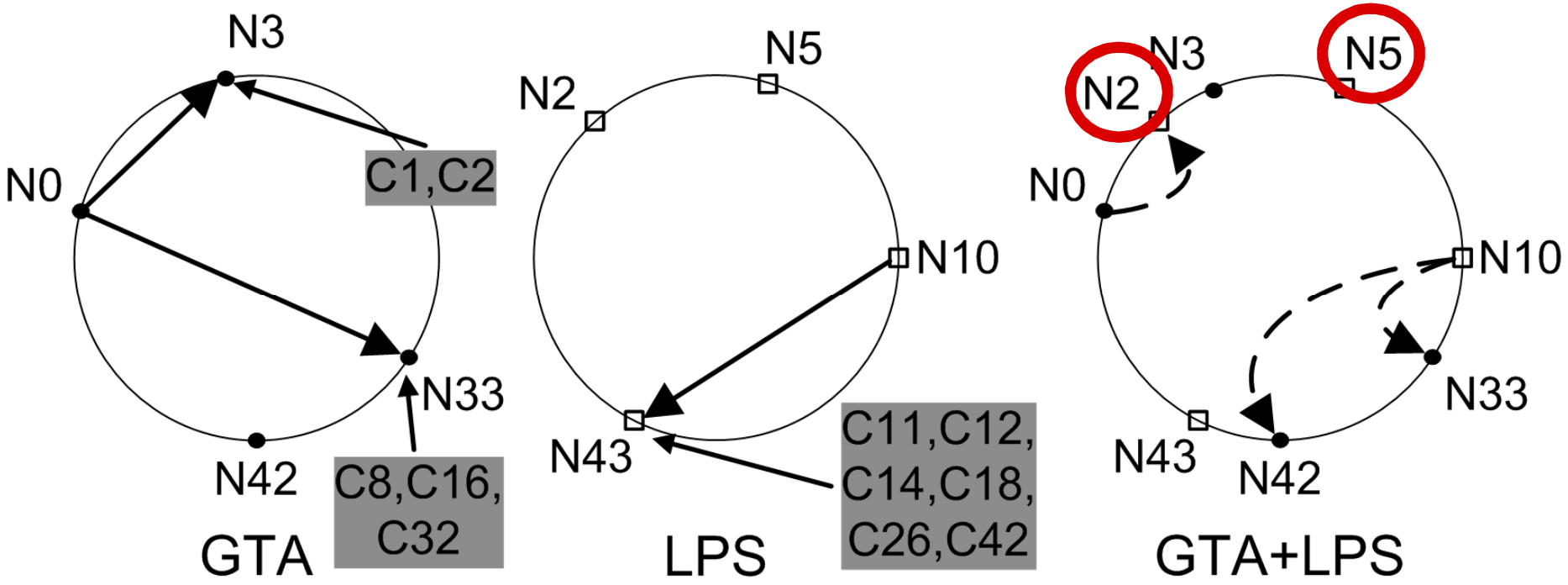
União dos Espaços de Endereçamento

- União do espaço de endereçamento apenas **adiciona** novas entradas
  - Regras para adição:
    - Um nó **N** em um domínio folha só pode criar uma ligação com um nó **N'** de outro domínio folha se somente se
      - **N'** for o vizinho mais próximo distante de até 2^m
    - O nó **N'** que atende o requisito da regra anterior deve ser mais próximo de **N** que qualquer outro vizinho de **N**
      - Nós do espaço de endereçamento vizinho mais próximos dos identificadores de chaves

União dos Espaços de Endereçamento

GTA / UFRJ

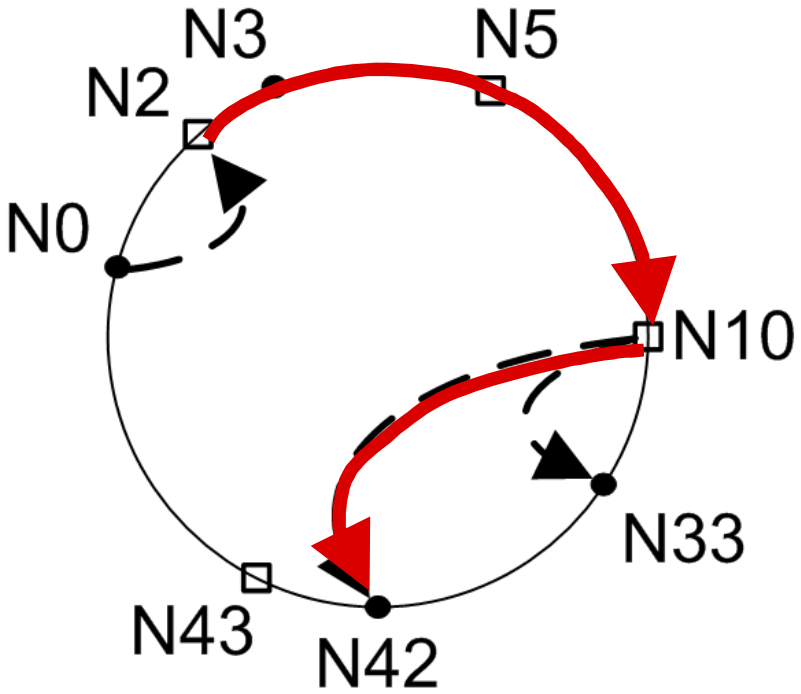
N0 não cria uma ligação com um nó N5 porque N3 está mais perto de N0 que de N5 (Regra 2)



União dos Espaços de Endereçamento

GTA / UFRJ

- Espaço de endereçamento final engloba todos os nós da rede
- Roteamento segue uma abordagem gulosa
  - Pacotes são encaminhados até o identificador no mesmo nível hierárquico mais próximo ao destino



E se N2 enviasse um pacote para N42?

Pacote de N2→N10, no mesmo domínio

Depois de N10→N42, no domínio diferente

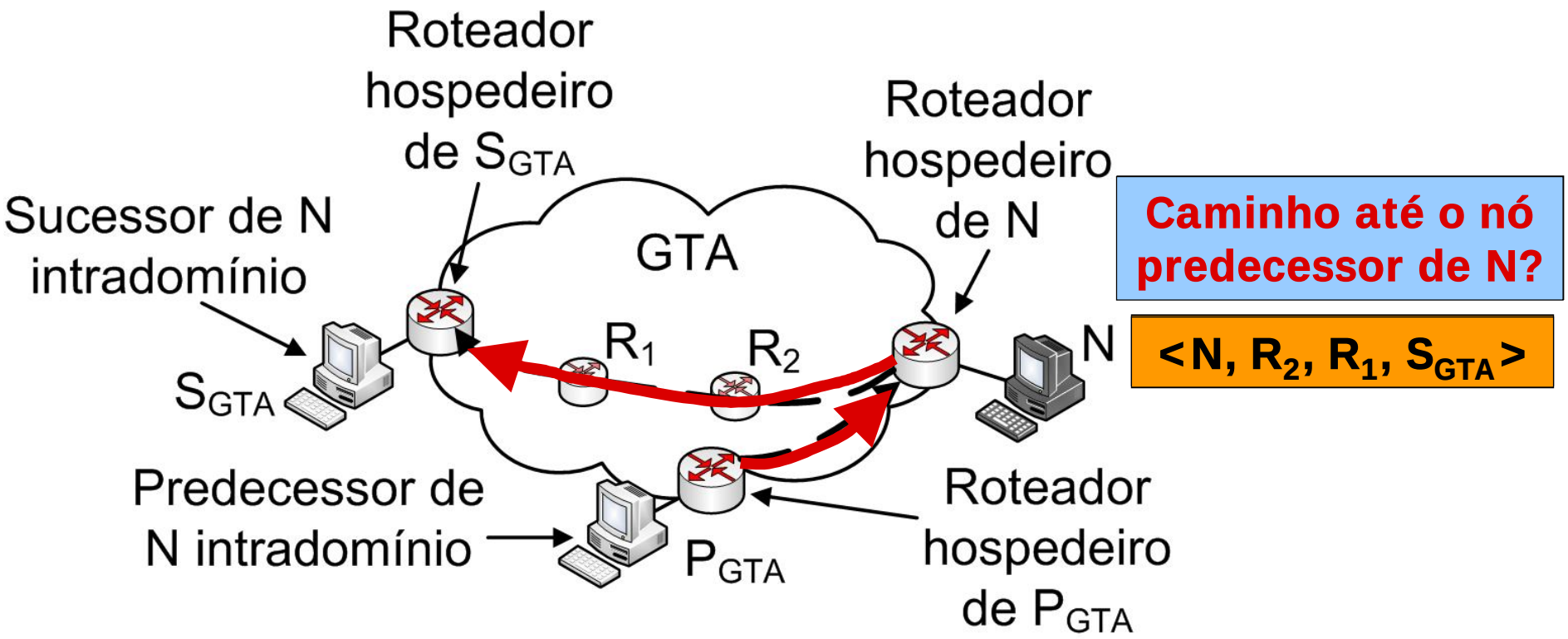
Funcionamento do ROFL

- Cada nó possui um nó sucessor e outro predecessor
  - Na rede intradomínio
- ROFL considera que os nós acessam a Internet via um roteador de interconexão (**roteador hospedeiro**)
  - Roteador armazena caminhos completos para:
    - Roteador hospedeiro do nó sucessor dos seus hóspedes
    - Roteador hospedeiro do nó predecessor dos seus hóspedes
  - Roteadores hospedeiros dos nós sucessores e predecessores também armazenam o caminho completo no sentido reverso

Funcionamento do ROFL

GTA / UFRJ

- Caminho completo
  - Sequência salto-a-salto de identificadores
    - Todos os roteadores físicos entre hospedeiros



Encaminhamento de Pacotes

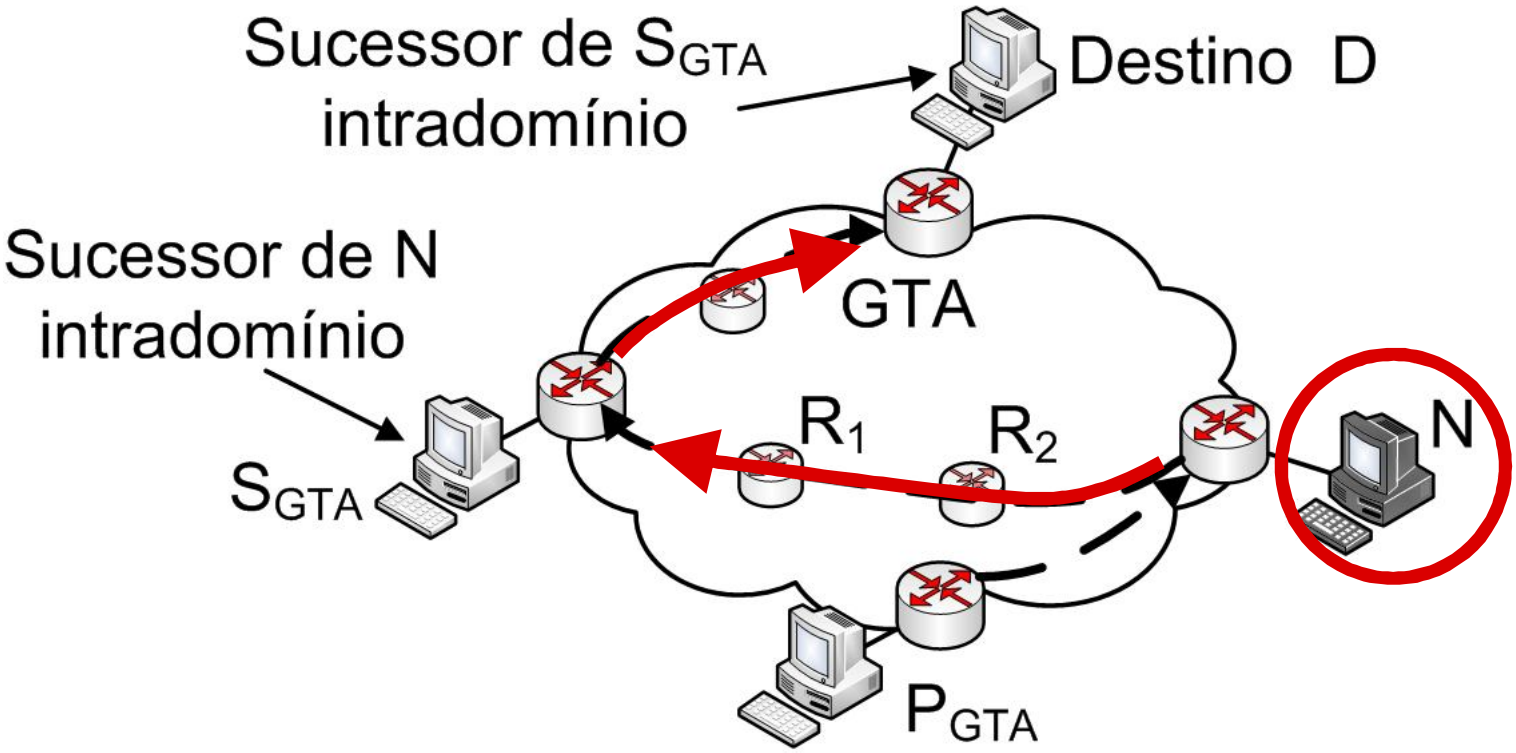
- Assim como no Chord, o roteamento é guloso
  - Auxiliado por tabela de roteamento
- Pacote enviado para um determinado identificador
  - Encaminhado até a estação mais próxima daquele identificador de destino
    - No pior caso, um pacote é encaminhado ao longo de todos os nós sucessores

Proximidade entre ponteiros está relacionado com a proximidade entre identificadores

Encaminhamento de Pacotes Intradomínio

GTA / UFRJ

- Pacotes são encaminhados entre a origem N e destino D
  - Pacotes passam por todos os nós sucessores dos nós hospedeiros no caminho



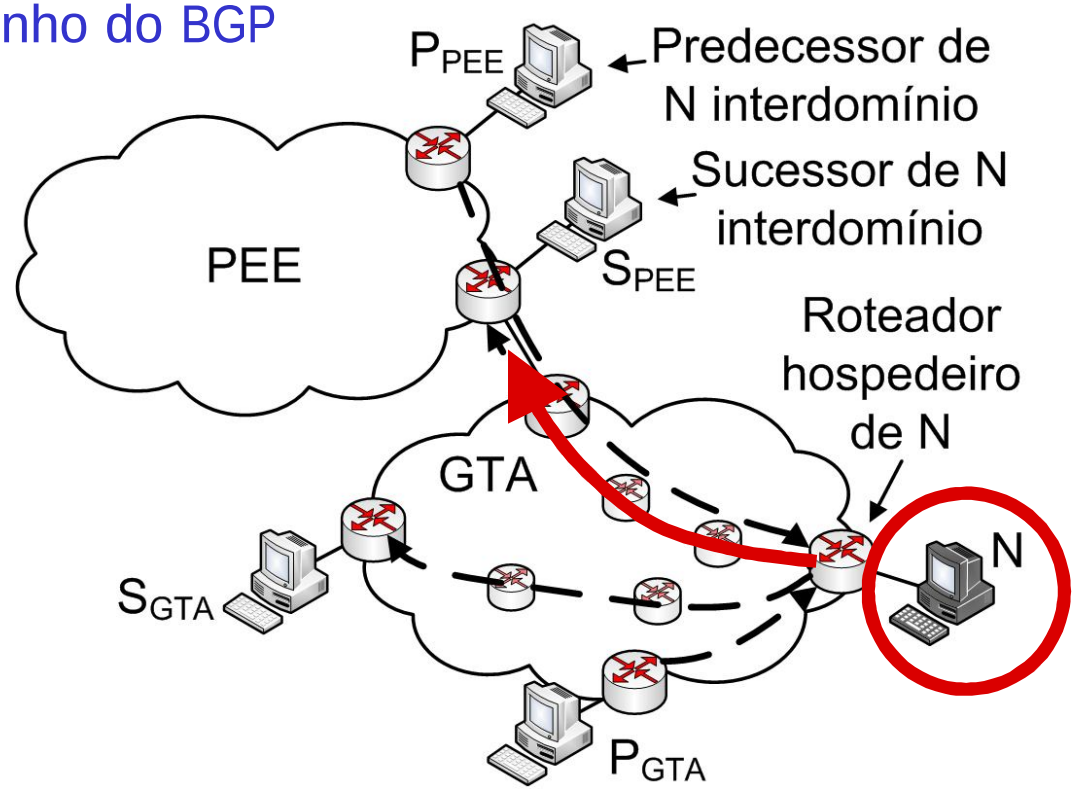
Encaminhamento de Pacotes Interdomínio

- Operação semelhante à do intradomínio
  - Exceto por considerar políticas de ASes
- Cada AS forma um espaço de identificação circular
  - ASes se comunicam através da estrutura em árvore
- ASes realizam união dos espaços de identificação
  - Processo dividido em três etapas:
    - Cada AS descobre os outros ASes hierarquicamente superiores
    - ASes se unem recursivamente, assim como no Canon
    - Cada AS define ponteiros para roteadores em ASes vizinhos

Encaminhamento de Pacotes Interdomínio

GTA / UFRJ

- Semelhante ao caso intradomínio...
  - Pacotes são encaminhados conforme o caminho de ASes
    - Armazenado nos roteadores hospedeiros como um vetor de caminho do BGP



Problemas do ROFL

- ROFL apresenta problemas de escalabilidade
  - Número de ponteiros armazenados para outros nós da rede
  - Carga de controle para o estabelecimento dos espaços de identificação circulares
  - Latência da entrada dos nós
  - Recuperação de falhas

Outras propostas vêm sendo realizadas com intuito de planificar o espaço de endereçamento da Internet

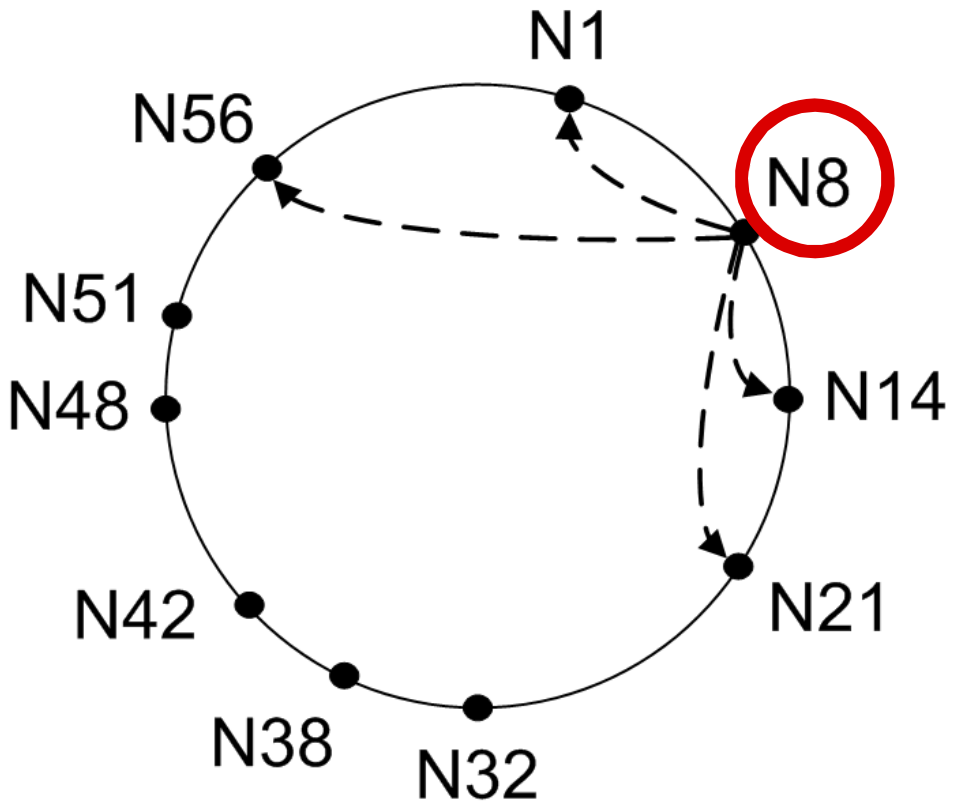
VRR (*Virtual Ring Routing*)

- Utilizado em redes sem-fio de múltiplos saltos
  - Problema de escalabilidade é reduzido ao lidar com um número menor de nós
    - Comparação com a Internet
- Funcionamento semelhante ao do ROFL intradomínio
  - Cada nó **N** mantém uma tabela de caminhos para os **m** vizinhos consecutivos mais próximos
    - Metade dos **m** vizinhos possui identificadores no sentido horário
    - Outra metade no sentido anti-horário

VRR (*Virtual Ring Routing*)

GTA / UFRJ

N8 possui m = 4 vizinhos, dois predecessores e dois sucessores



VRR (*Virtual Ring Routing*)

- Caminhos são definido pelos:
  - Identificadores de origem e destino
  - Identificadores do próximo salto na rede física
    - Não armazena caminhos completos
- Tabela de caminhos é diferente da tabela do ROFL
  - Nós sucessores e predecessores consecutivos armazenados
  - Informações da rede física empregadas
    - Desenvolvido para uso em redes sem-fio

AIP
(*Accountable Internet Protocol*)

- Evita prefixos e endereços sem classes definidas CIDR (*Classless Inter-Domain Routing*)
  - Retorno à estrutura original de endereços da Internet
    - Concatenação do **identificador de rede** com o **da estação**
    - Estrutura possuía dois níveis hierárquicos
      - Um de rede e outro de estações

O AIP utiliza uma abordagem com dois níveis hierárquicos, diferente do ROFL e do VRR

AIP (*Accountable Internet Protocol*)

- Níveis hierárquicos usados pelo AIP:
  - Domínio de responsabilização (*Accountability Domain* - AD)
    - Nível dos roteadores
  - Identificador de pontos finais (*End-point IDentifier* - EID)
    - Nível das estações

Divisão reduz os problemas de escalabilidade comparado ao ROFL, mas não desassocia completamente o identificador do nó do identificador da rede

Funcionamento no AIP

- Concatenação do identificador do domínio (AD) com o identificador do nó (EID)
  - AD e EID são formados da saída de funções *Hash*
    - Ambos são calculados com chave pública do domínio e da estação
      - Possibilita autenticação da origem
- Conexões TCP
  - Estabelecidas utilizando apenas o identificador do nó
    - Nós podem se deslocar se o identificador for único globalmente
      - Emprego de parte do endereço MAC no identificador

Encaminhamento de Pacotes no AIP

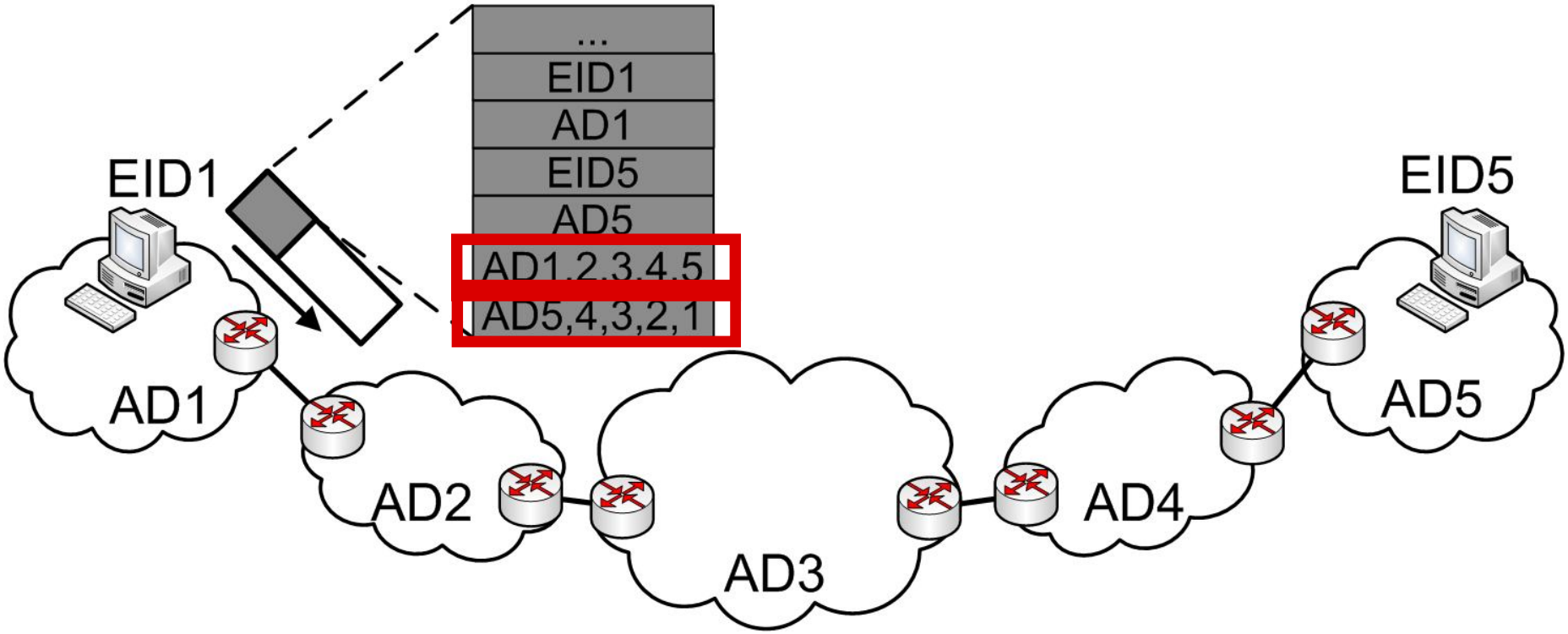
- Utiliza roteamento pela fonte no nível dos domínios
  - Ausência de organização hierárquica
  - Dispensa de prefixos de rede

Impedem que o encaminhamento seja feito por técnicas de busca de melhor prefixo

- Cabeçalho do pacote possui:
  - Identificadores do nó e do domínio de origem e vice-versa
  - Pilhas de identificadores dos domínios entre a origem e o destino
    - Todas as informações são nos dois sentidos de transmissão

Encaminhamento de Pacotes no AIP

GTA / UFRJ



Caminho de volta inserido no cabeçalho dos pacotes

Desvantagens do AIP

- AIP, assim como o ROFL, possui problemas de:
  - Escalabilidade e aplicabilidade na Internet
- Em ambos os casos, a infraestrutura da Internet precisaria ser alterada
  - Desde sistemas finais até roteadores para adotar qualquer uma das propostas
- Portanto...
  - Emprego dessa estratégia ainda não é óbvio
    - Apesar de solucionar problemas como a mobilidade

Mobilidade de Rede

GTA / UFRJ

- Mobilidade na Internet
  - Relacionada à mobilidade de uma **única estação**
- Entretanto...
  - A mobilidade pode estar relacionada a uma rede
    - Conjunto de uma ou mais estações conectadas
  - Ex.: Modelo base do IP móvel
    - Define a existência de:
      - Agente estrangeiro e agente domiciliar
      - Estação correspondente e estação móvel

Não é considerada a possibilidade de uma rede móvel inteira

Mobilidade de Rede

GTA / UFRJ

- Popularização do sem-fio requer extensão do suporte
  - Casos típicos:
    - Redes móveis ad hoc
    - Redes móveis veiculares
    - Redes pessoais

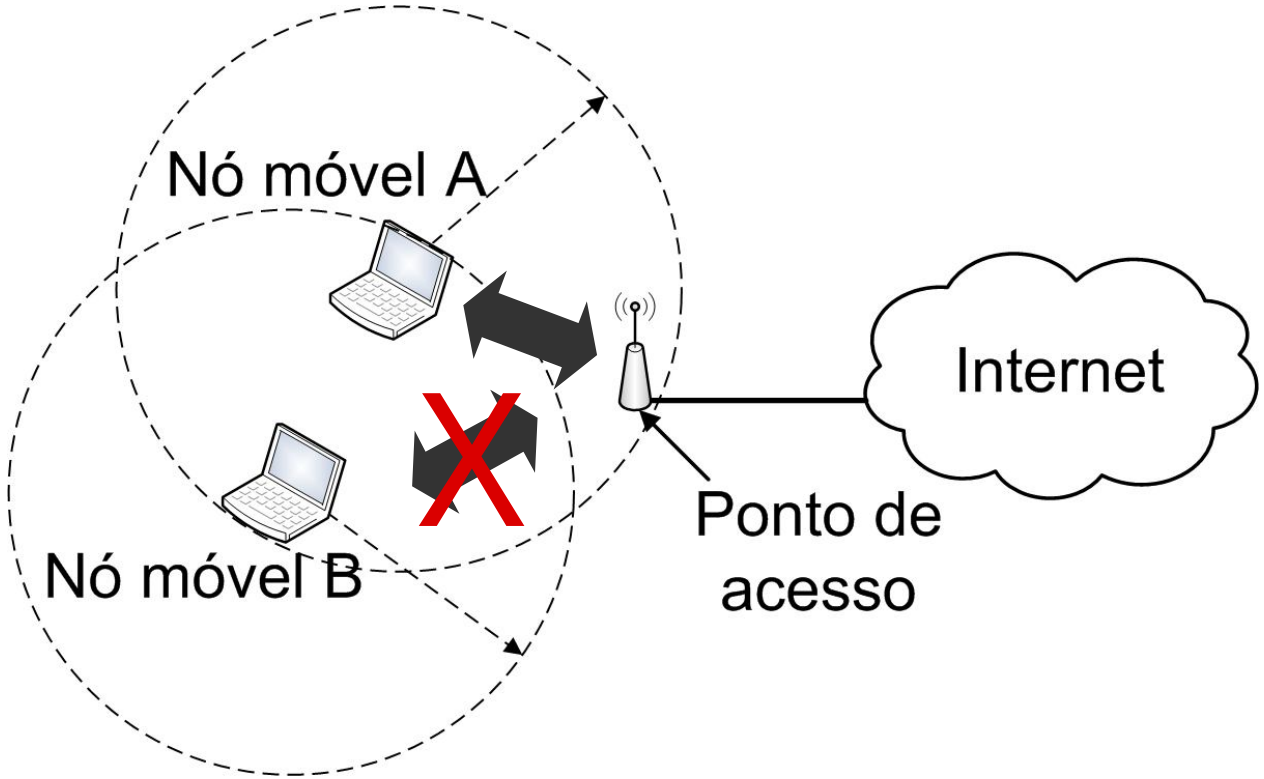
Em todos esses cenários as diferentes estações se deslocam em conjunto e mantêm a conectividade entre si e com a Internet

- Conexões estabelecidas devem permanecer ativas
  - Mesmo após troca do ponto de interconexão à Internet

Limitações do Modelo

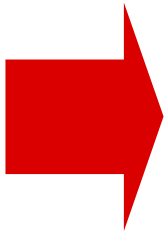
GTA / UFRJ

- Modelo base do IP móvel
  - Estações sem acesso direto ao ponto de interconexão
    - **Não têm conectividade com a rede**



Propostas para Mobilidade de Rede

- Visam possibilitar que:
  - Nós sem acesso direto ao ponto de interconexão possam acessar a rede através dos nós vizinhos



Garantia de conectividade e acesso à Internet não somente para estação, mas para toda rede móvel

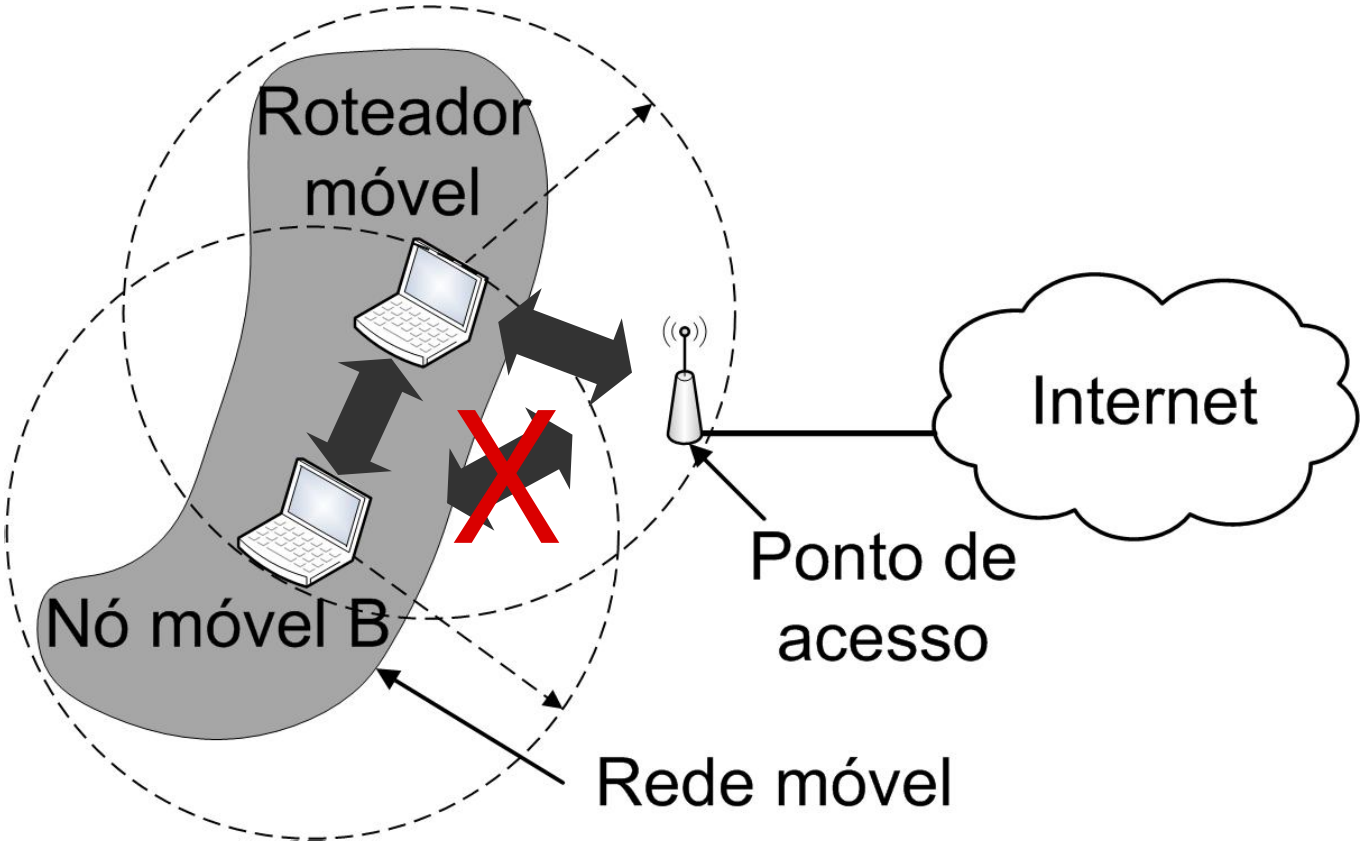
  - Exemplos:
    - NEMO (*NEtwork MObility*)
    - NEMO+
    - Light-NEMO+
    - MANEMO (*MAnet NEMO*)

NEMO (*NEtwork MObility*)

- Provê acesso à Internet a todas as estações da rede móvel
- Elege uma das estações da rede móvel para cumprir o papel de roteador
  - Estações que não possuem acesso direto ao ponto de interconexão...
    - Encaminham os seus pacotes até o roteador eleito (***Mobile Router* - MR**)

NEMO (*NEtwork MObility*)

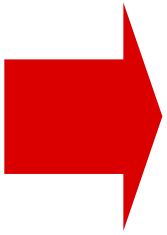
GTA / UFRJ



Funcionamento do NEMO

NEMO (*NEtwork MObility*)

- Projeto inicial é fortemente baseado no IP móvel
  - Extensão do IP móvel
    - **Funcionalidades definidas pelo IP móvel para estação são transferidas para o roteador móvel**
      - Alterações após mudanças de ponto de interconexão com a Internet são tratadas apenas pelo roteador móvel



Mudanças são transparentes para os outros nós da rede móvel

Funcionamento do NEMO

- Emprego de agentes domiciliares, assim como no IP móvel
  - Roteadores móveis enviam atualizações aos seus agentes domiciliares
    - Mantêm a localização na rede estrangeira
- Associação do endereço do roteador móvel a um **prefixo de rede**
  - Endereço na rede estrangeira (CoA) é um prefixo
    - Se torna o prefixo da rede móvel

Funcionamento do NEMO

- Roteadores móveis possuem uma interface IPv6 ou IPv4
  - Interface de ingresso pertence à rede móvel
    - Pode ser configurada de maneira estática
  - Interface de egresso conectada à rede de interconexão
    - Oferece conexão de saída para a Internet
    - É registrada na rede domiciliar
- Túnel bidirecional estabelecido entre o roteador móvel e o seu agente domiciliar
  - Agente domiciliar encaminha:
    - Tráfego destinado ao roteador móvel
    - Tráfego do prefixo de rede associado ao roteador móvel

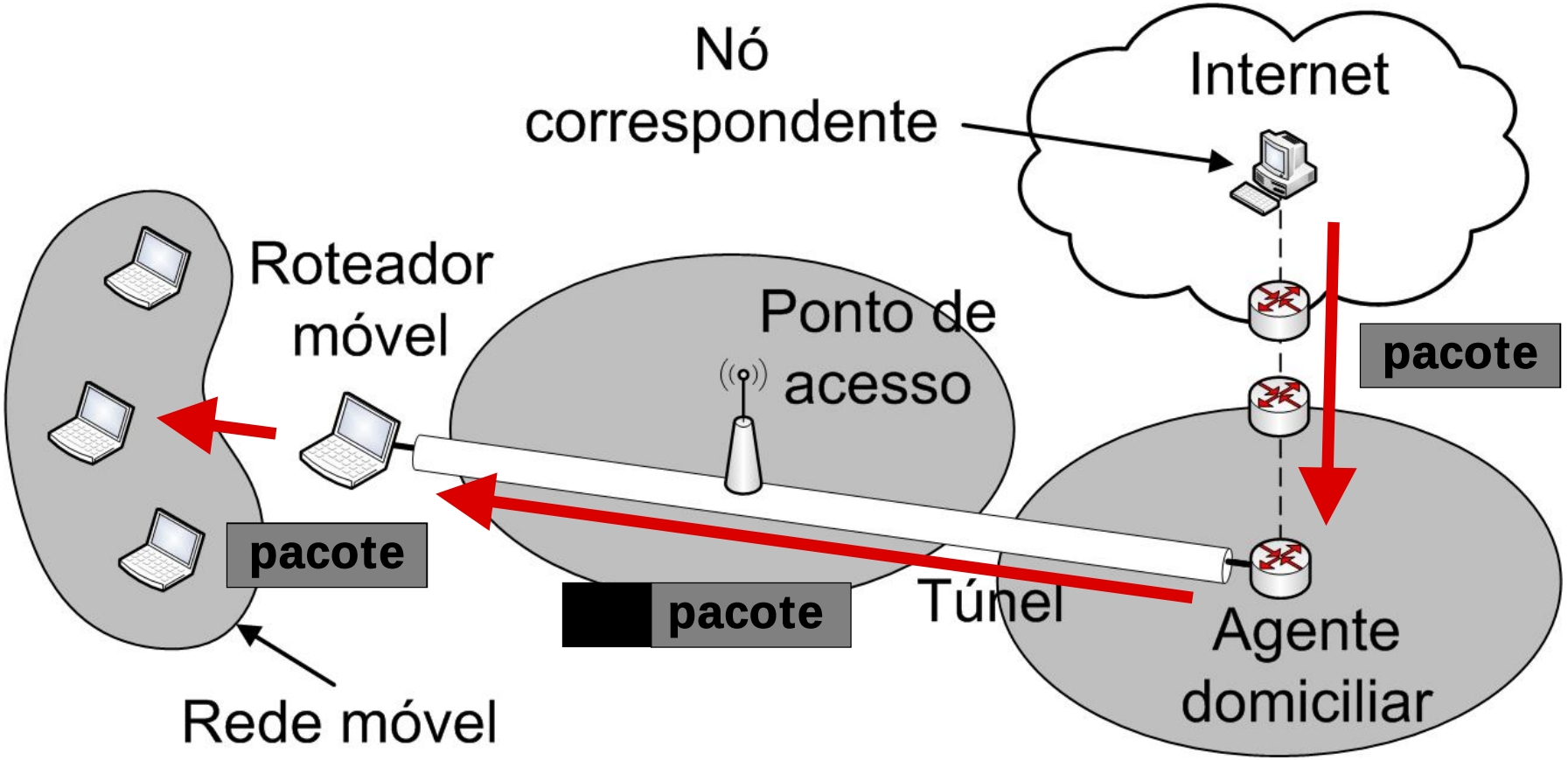
Encaminhamento de Pacotes

- Agentes domiciliares
  - Recebem pacotes destinados aos nós da rede móvel
    - A partir do prefixo da rede
  - Encapsulam e encaminham pacotes até o roteador móvel

- Roteadores móveis
  - Desencapsulam e encaminham os pacotes recebidos
    - Até os respectivos destinatários na rede móvel
  - Encaminham para a Internet os pacotes da rede móvel
  - Em caso de filtragem na rede estrangeira...
    - Encapsulam e encaminham pacotes até o agente domiciliar

Encaminhamento de Pacotes

GTA / UFRJ



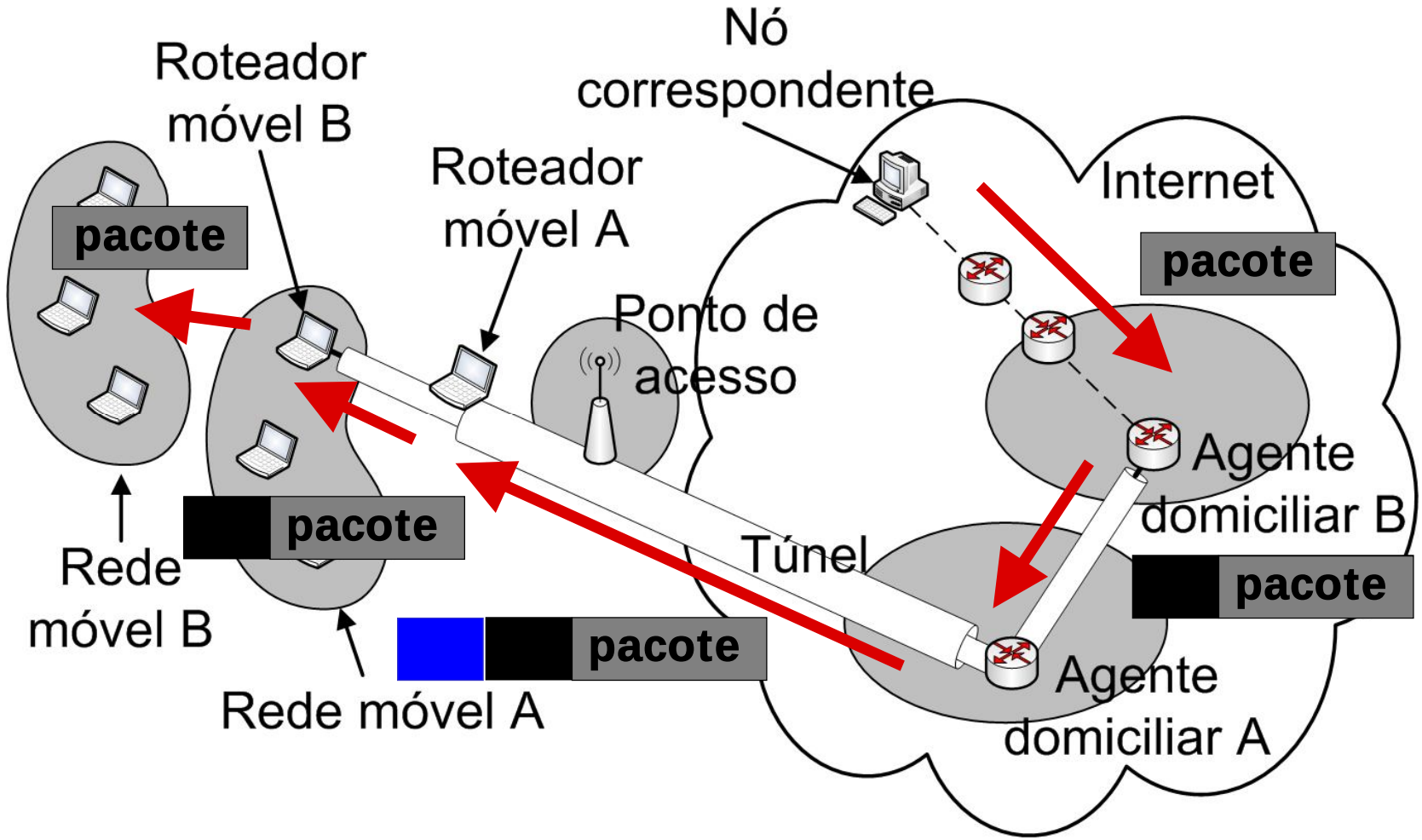
Ineficiência do Encaminhamento de Pacotes no NEMO

- Um único roteador móvel pode ter associado a ele mais de uma rede móvel
  - Redes móveis podem coexistir
  - Roteador móvel de uma rede pode utilizar o roteador móvel de outra rede para se comunicar com a Internet
    - Nesse caso, o NEMO é conhecido como **Nested NEMO**

Ineficiência nas comunicações visto que todo tráfego enviado pelos roteadores móveis devem passar pelos seus agentes domiciliares

Nested NEMO

GTA / UFRJ



Propostas para Contornar a Ineficiência do Roteamento

- Redução do número de agentes domiciliares nos caminhos entre os nós da rede móvel e os nós da Internet
  - Nós em redes móveis diferentes
    - Roteamento pela fonte é uma possibilidade

- NEMO+ é uma das principais propostas
  - Três protocolos diferentes são definidos:
    - TD (*Tree Discovery*)
    - NINA (*Network In Node Advertisement*)
    - RRH (*Reverse Routing Header*)

TD (*Tree Discovery*)

- Considera a topologia da rede em árvore
  - Ponto de interconexão da rede
    - Raiz
  - Roteadores móveis vizinhos
    - Folhas

TD (*Tree Discovery*)

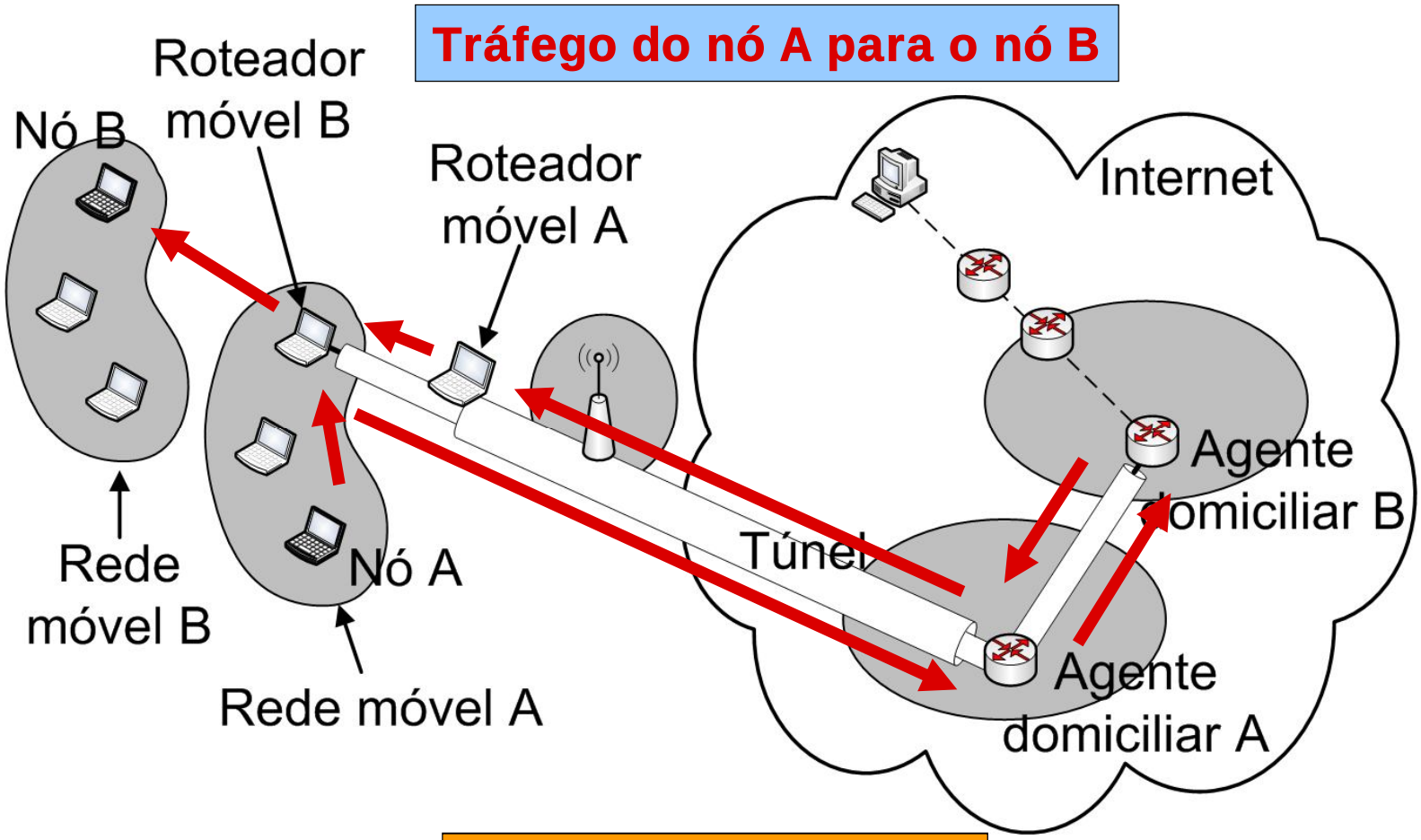
- Auxilia os roteadores móveis a escolher o melhor roteador móvel vizinho
  - Escolha baseada em anúncios de descoberta de vizinhança
    - Cada anúncio contém o caminho até o ponto de interconexão com a Internet
      - Caminho representa um ramo da árvore
  - Ao receber o anúncio...
    - Cada roteador escolhe o ramo da árvore que mais lhe convém se associar

NINA
(*Network In Node Advertisement*)

- Anuncia os prefixos das sub-redes associados a cada roteador móvel
  - Simplifica a comunicações entre nós móveis associados a redes diferentes da mesma árvore
    - Nós móveis podem se comunicar sem usar os seus agentes domiciliares

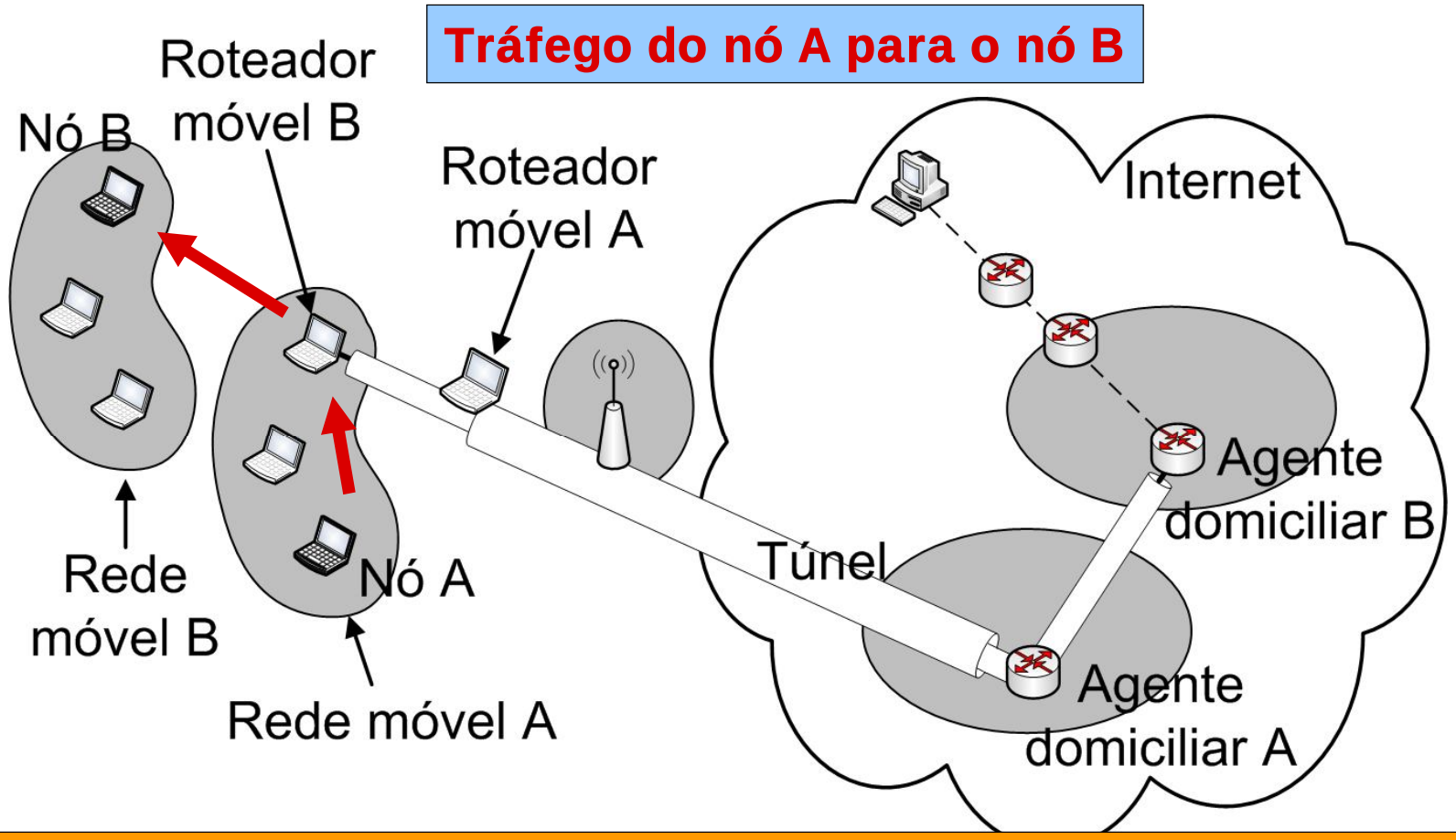
Encaminhamento no NINA

GTA / UFRJ



Encaminhamento no NINA

GTA / UFRJ



Com o uso do NINA, nó A descobre que o roteador móvel de B pode encaminha o tráfego de maneira mais eficiente

RRH (*Reverse Routing Header*)

- Aumenta a eficiência do envio de pacotes para a Internet
  - Roteadores móveis atualizam o endereço IP de origem dos pacotes antes de encaminhá-los
- Troca o endereço IP de origem pelo endereço do último roteador móvel que encaminhou o pacote
  - Endereço de origem anterior é armazenado no cabeçalho
    - Lista contém o endereço IP de todos os roteadores móveis atravessados
- Utiliza no caminho reverso da lista dos endereços IP
  - Caminho reverso não passa pelos agentes domiciliares

Light-NEMO+

GTA / UFRJ

- Possui abordagem diferente do protocolo RRH
  - Último roteador armazena um identificador do fluxo e encaminha o pacote até o nó da Internet
    - Semelhante a um *cookie*
  - Os pacotes cuja fonte ou destino estejam na rede móvel também carregam o *cookie* de identificação do fluxo
    - Pacotes da Internet recebidos pelo último roteador móvel possui identificação utilizada para mapeamento

O Light-NEMO+ evita o uso de roteamento pela fonte como o RRH

MANEMO (*MAnet NEMO*)

- Visa garantir acesso direto à Internet aos nós móveis de uma rede ad hoc
  - Roteadores móveis possuem:
    - Interface de ingresso configurada conforme a rede estrangeira
    - Interface de egresso configurada conforme a rede ad hoc a qual faz parte
      - Executa um protocolo de roteamento ad hoc, p. ex. o OLSR
      - Se anuncia como *gateway* para a Internet

Múltiplos Caminhos

- Internet atual é baseada em algoritmos de caminho único
  - Protocolos intradomínio
  - Protocolos interdomínio
    - Representado principalmente pelo BGP

Protocolos de caminho único anunciam apenas uma opção de caminho para o destino

- Roteamento pela fonte
  - Solução trivial para implementar os múltiplos caminhos
    - Definição de rotas *a priori* possibilita utilizar caminhos diferentes dos escolhidos pelos protocolos de roteamento

BANANAS

- Utiliza roteamento pela fonte
  - Usa o conceito de **`PathIDs`** para identificação de caminhos
    - PathID: *Hash* dos identificadores do caminho
      - Concatena o identificador do destino
    - PathIDs são globalmente conhecidos
      - Intradomínio: Identificadores dos vértices e enlaces
      - Interdomínio: Identificadores de ASes
    - PathIDs são adicionados a cada pacote

Conhecimento global intradomínio é alcançado com protocolos baseados em estado do enlace, e interdomínio com vetores de caminho do BGP

Encaminhamento no BANANAS

- Considera o roteamento intra e interdomínio
  - Intradomínio: Roteador fonte envia os pacotes pelos múltiplos caminhos encontrados
    - Utiliza ao invés da tupla

```
<prefixo do end. de dest., próx. salto, interface de saída>
```

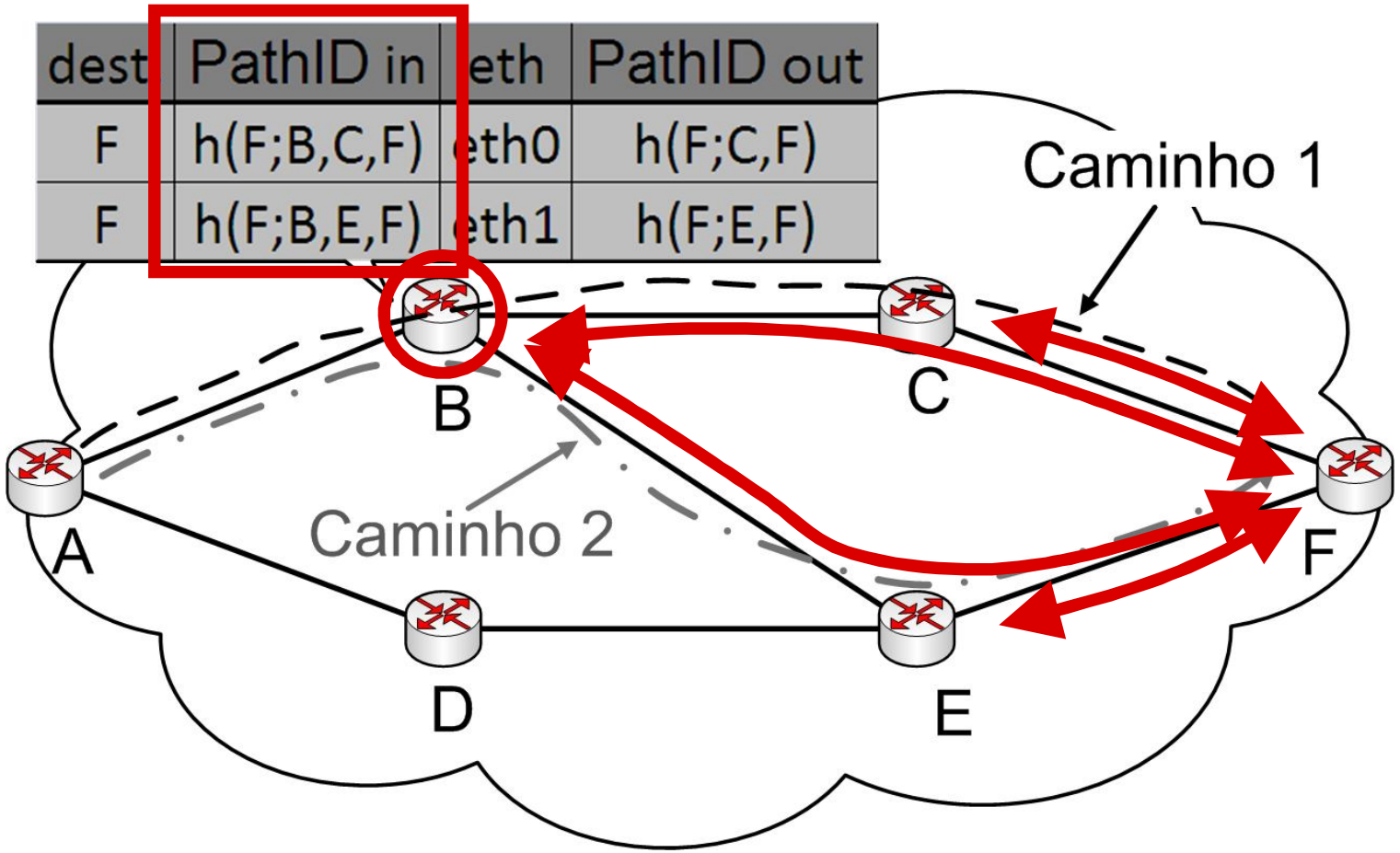
a tupla

```
<prefixo do end. de dest., PathID de entrada,
interface de saída, PathID de saída>
```

  - PathID de entrada: *Hash* de todos os identificadores dos roteadores a partir do roteador atual até o destino
  - PathID de saída: *Hash* dos identificadores desde o próximo salto até o destino

Encaminhamento Intradomínio

GTA / UFRJ



Encaminhamento Intradomínio

- Ao receber um pacote...
  - Roteador busca a entrada na tabela de roteamento
    - Busca baseada no prefixo do endereço de destino e no **`PathID`** de entrada
- Antes de encaminhar o pacote...
  - Roteador substitui o **`PathID`** do pacote pelo **`PathID`** de saída
    - Próximo roteador no caminho pode repetir o mesmo procedimento de encaminhamento

Encaminhamento Intradomínio

- Roteadores executam algoritmo múltiplos caminhos
  - Roteadores intermediários
    - Devem conhecer todos os possíveis caminhos dele até os possíveis destinos da rede

Roteadores intermediários precisam encaminhar os pacotes seguindo os caminhos escolhidos pelas fontes

- Roteadores armazenam múltiplos caminhos
  - Tabelas de roteamento aumentam

Encaminhamento Interdomínio

- Abstração do roteamento intradomínio
  - Substitui roteadores por ASes
    - Papel dos roteadores de borda de um AS é o mesmo que o papel das interfaces de um roteador
  - Adiciona também um **`PathID`** aos pacotes
    - Nesse caso chamado de **`e-PathID`**
      - Identificadores são os identificadores dos ASes do caminho

Encaminhamento Interdomínio

- Roteador de borda de **entrada** de um AS ao receber um pacote...
  - Examina o prefixo do endereço de destino
  - Encaminha até o roteador de borda de saída correspondente
    - Endereço IP do roteador de borda de saída é utilizado como endereço de destino do pacote
    - Endereço de destino original é armazenado em uma estrutura em pilha
      - Endereço do roteador de borda de saída é inserido no topo

Encaminhamento Interdomínio

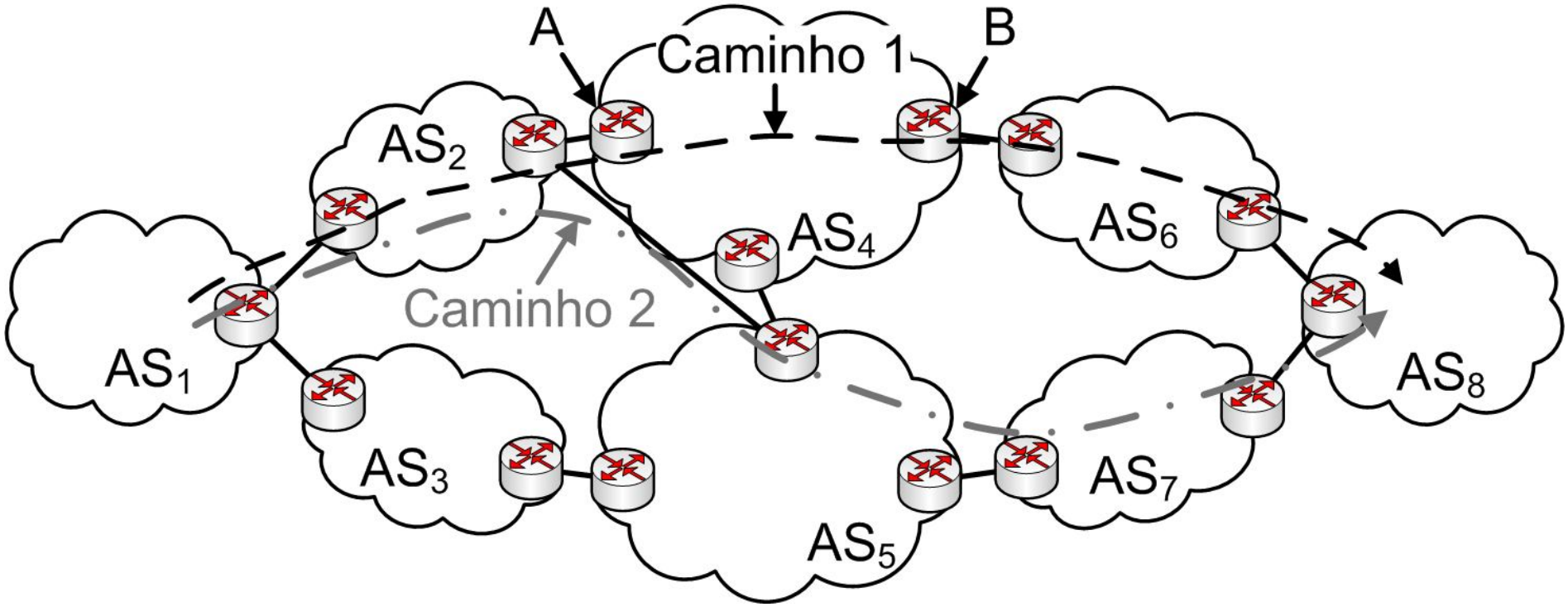
- Roteador de borda de **saída** ao receber o pacote...
  - Retira o seu endereço do topo da pilha
  - Reinsere o endereço IP original do destino no pacote

- Roteador de borda de entrada do próximo AS repete o procedimento
  - **`PathID`** utilizado em cada AS deve ser calculado baseado no caminho intradomínio escolhido

Dentro de cada AS o encaminhamento segue como se fosse o encaminhamento intradomínio normal

Encaminhamento Interdomínio

GTA / UFRJ



O encaminhamento interdomínio deve lidar com políticas entre ASes que é algo que não ocorria no intradomínio

Redes Sobrepostas

- Podem ser utilizadas para prover múltiplos caminhos
  - Não exige modificações dos equipamentos do núcleo da rede
    - Múltiplos caminhos são escolhidos na camada sobreposta
    - Encaminhamento segue o processo tradicional da Internet
  - Entretanto…
    - Reduz o controle das rotas escolhidas por parte dos ASes de trânsito

- Arquitetura RON (*Resilient Overlay Network*)
  - Proposta inicialmente para recuperação de falhas de rede
    - Entretanto, pode ser utilizada também para múltiplos caminhos na Internet

MIRO
(*Multipath Interdomain ROuting*)

- Oferece maior flexibilidade aos ASes de trânsito
  - Não usa nem redes sobrepostas nem roteamento pela fonte
- Baseado na negociação entre ASes vizinhos para uso de múltiplos caminhos
  - Cada AS anuncia apenas o caminho que mais lhe convém
    - Devido a questões de políticas, implementação dos protocolos e escalabilidade

Limitação existe mesmo que os múltiplos caminhos existam

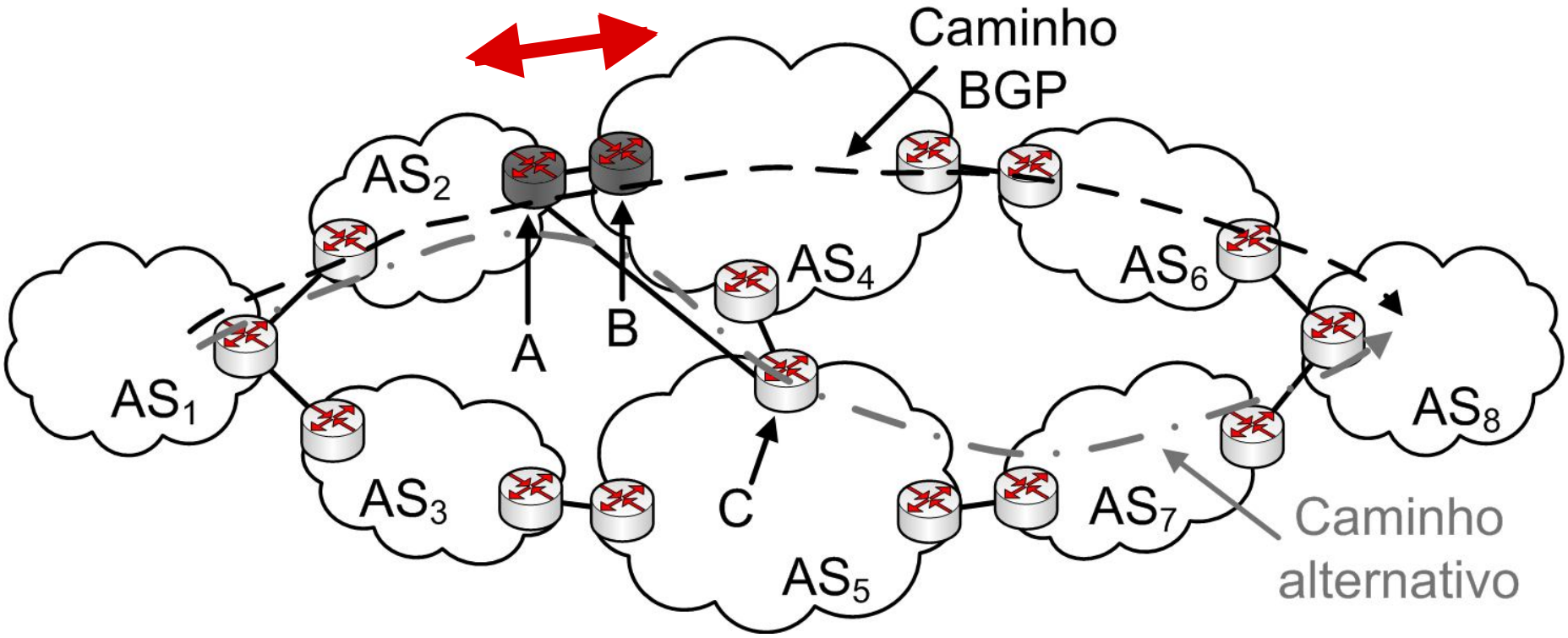
Funcionamento do MIRO

- ASes devem requisitar os múltiplos caminhos
  - Problemas de escalabilidade são contidos
  - Implementação na Internet pode ser feita gradualmente
    - Um AS que não use o MIRO não responde às requisições
  - Requisições podem ser feitas para mais de um AS vizinho
    - Possibilidade de obtenção de mais caminhos alternativos
- ASes podem anunciar caminhos alternativos conhecidos
  - ASes podem utilizar os caminhos alternativos conhecidos pelos seus vizinhos

Funcionamento do MIRO

GTA / UFRJ

Caminh	Através de AS_5?	evite AS_6?



Funcionamento do MIRO

- Caminhos do BGP padrão continuam sendo usados
- Caminhos alternativos são usados através de túneis
  - Pacotes que são enviados via caminho alternativo são enviados por túnel
    - Formado entre roteadores dos ASes vizinhos para garantir que o caminho alternativo seja, de fato, utilizado
  - Identificador do túnel:
    - Enviado pelo AS mais próximo ao destino para o AS mais próximo à fonte
      - Após o término do procedimento de negociação

Escalabilidade na Internet do Futuro

- Possuem **problemas de escalabilidade**
  - Aumento do número de entradas nas tabelas de roteamento
    - Múltiplos caminhos
      - Inserem múltiplas entradas para um mesmo destino
    - Múltiplos domicílios
      - Utilizam prefixos desagregados para a mesma rede
    - Identificadores planos
      - Utilizam espaço de identificação sem organização hierárquica
  - Aumento da sobrecarga de controle
    - Aumento do número de ASes
      - Enviam mensagens a todos os outros ASes

Problemas Resultantes

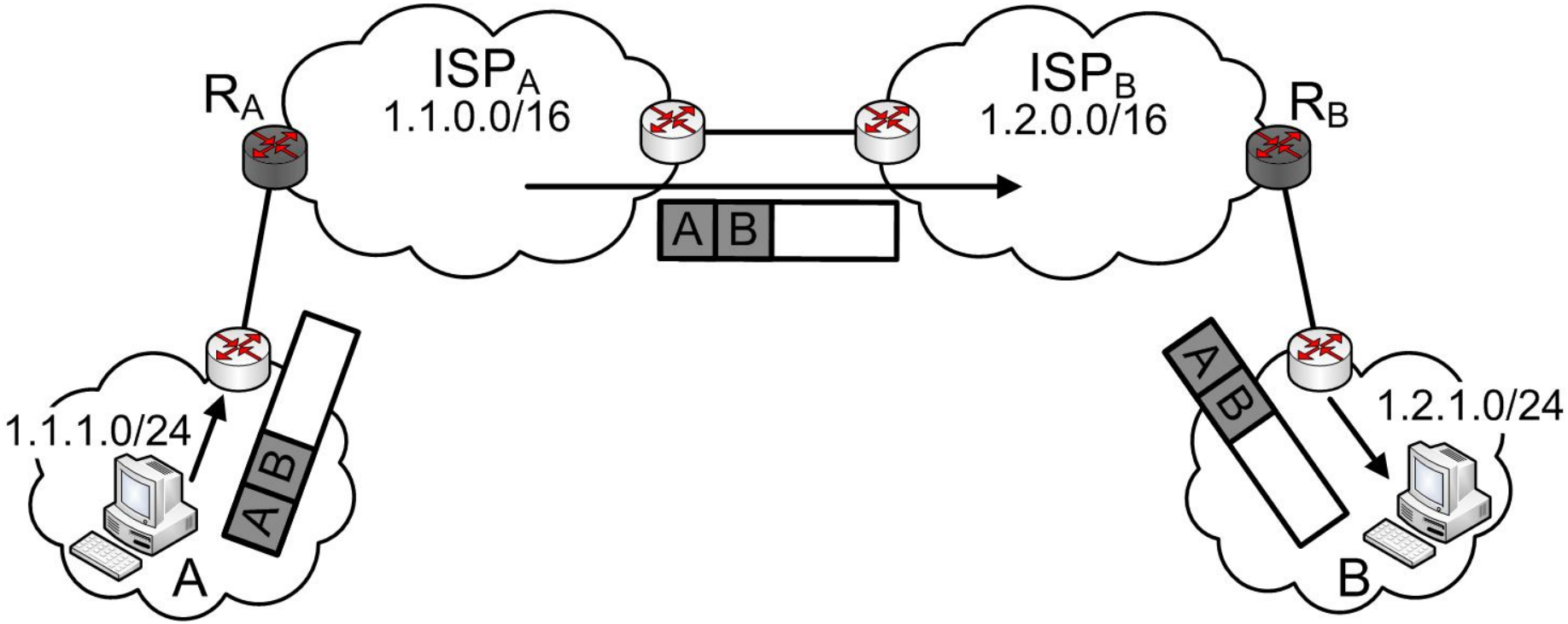
- Aumento acelerado do número de entradas nas tabelas de roteamento
  - Impacto na capacidade de armazenamento dos roteadores
    - Inconsistências entre as tabelas
    - Problemas de funcionamento dos equipamentos de rede
- Aumento excessivo do número de mensagens de controle
  - Sobrecarga de tráfego
  - Instabilidades nas tabelas de roteamento

Redução da Flexibilidade

- Propostas simples para conter problemas de escalabilidade
  - Impacta as propostas de múltiplos domicílios
    - Introduz duas restrições às redes de acesso:
      - Emprego da mesma faixa de endereço dos seus ISPs
      - Proibição da desagregação das faixas de endereços recebidas dos seus ISPs
    - Estações multidomiciliadas devem usar endereços IPs pertencentes à faixa dos seus ISPs
      - ISPs podem anunciar prefixos de rede agregados

Redução da Flexibilidade

GTA / UFRJ



Endereço IP da rede de acesso do nó A pertence à faixa de endereço do ISP_A

Redução da Flexibilidade

- Desvantagem da abordagem simples
  - Dependente dos interesses dos administradores
    - Administradores devem concordar em utilizar apenas faixas de endereços dos seus provedores diretos

Separação do Espaço de Endereçamento

- Proposta mais flexível para aumento da escalabilidade
  - Separação do espaço de endereçamento
    - Endereços **Globalmente Roteáveis**
      - Presentes nas tabelas de roteamento da DFZ
      - Endereços dos ISPs
    - Endereços **Globalmente Entregáveis**
      - Presentes nas redes das bordas da Internet
      - Endereços das redes de acesso

Separação do Espaço de Endereçamento

- **Endereços Globalmente Roteáveis**
  - Apenas alcançáveis na DFZ
    - ISPs devem ser capazes de se comunicar
- **Endereços Globalmente Entregáveis**
  - Únicos e alcançáveis de qualquer lugar da Internet
    - Clientes devem ser capazes de se comunicar
  - Ausentes das tabelas da DFZ

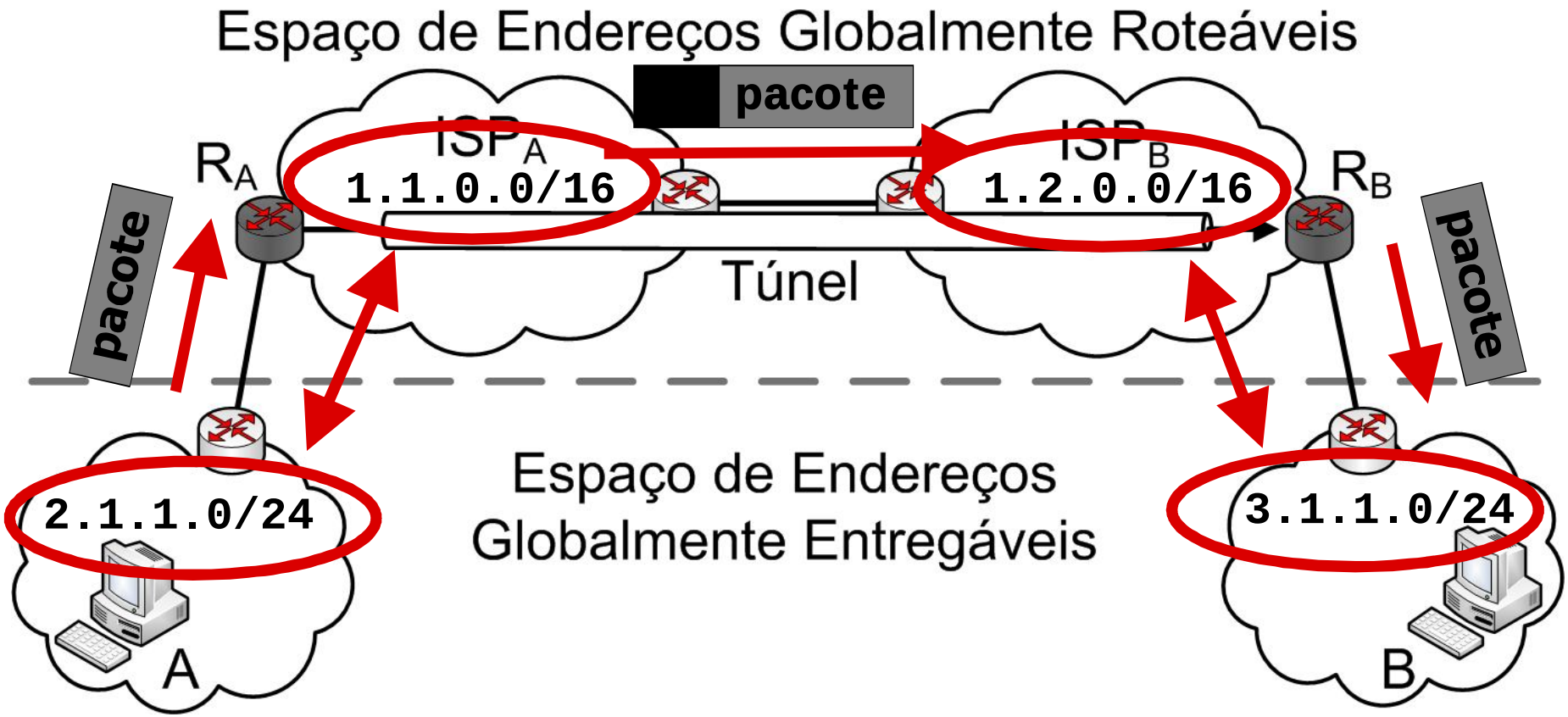
A ausência de endereços de redes de borda nos roteadores da DFZ diminui o número de entradas e de prefixos anunciados pelo BGP

Separação do Espaço de Endereçamento

- Como garantir acesso global aos clientes?
  - **Mapeamento** entre os dois tipos de endereços
    - Realizado nos roteadores de borda dos ISPs
- Encaminhamento
  - Roteadores de borda descobrem o mapeamento
    - Baseado no endereço de destino do pacote recebido
  - Após o mapeamento, roteadores encapsulam o pacote e enviam através de túnel
    - Formado até a roteador de borda da rede do destino
  - Roteadores de borda da rede do destino desencapsulam o pacote e entregam à estação correspondente

Encaminhamento de Pacotes

GTA / UFRJ



Endereços não-agregáveis → Flexibilidade da separação

Vantagens e Desvantagens da Separação

- Permite que cada ISP agregue o maior número de faixas de endereços possível
  - Cada rede de acesso pode usar faixas independentes do ISP
    - Facilita o uso dos múltiplos domicílios
    - Facilita a mudança das faixas de endereços das rede de acesso

Mudanças devem ser conhecidas pelos roteadores responsáveis pelo mapeamento para que os outros roteadores de borda conheçam os mapeamentos existentes atualizados

- Entretanto...
  - Atualização do mapeamento gera problema de escalabilidade
    - Mensagens de controle são enviadas para toda DFZ

Vantagens e Desvantagens da Separação

- Redução da sobrecarga do mapeamento
  - Diminuição do número de mensagens
    - Uso do *multicast*
  - Emprego de sistemas de resolução de nomes
    - Uso de sistemas como o DNS
- Soluções para reduzir sobrecarga podem inserir problemas
  - Uso do *multicast* não é trivial na Internet
  - Uso de sistemas como o DNS pode inserir atrasos na resolução de endereços

APT (*A Practical Tunneling*)

- Solução híbrida para o problema da sobrecarga do mapeamento
  - Apenas um número reduzido de elementos por rede na DFZ recebem informações de mapeamento
    - Elementos denominados DM (*Default Mappers*)
- Armazenamento do mapeamento
  - DM armazenam as tabelas completas
  - Roteadores de borda armazenam apenas as informações dos últimos mapeamentos realizados em memória cache

Encaminhamento no APT

- Ao receber um pacote, o roteador de borda...
  - Verifica se o mapeamento específico está em sua cache
    - Caso esteja, o pacote é encapsulado e enviado
    - Caso contrário, ele é encaminhado até o DM
- DM trata o pacote como uma requisição de mapeamento
  - Como resposta, envia o mapeamento até o roteador de borda requisitante
  - Encapsula e encaminha o pacote em nome do roteador requisitante

Vantagens do APT

- Estratégia evita que roteadores de borda armazenem tabelas completas
  - Reduz o tamanho das tabelas utilizadas
  - Reduz a necessidade de rapidez de encaminhamento pelos DMs
    - DMs não encaminham muitos pacotes

Limitações da Separação do Espaço de Endereçamento

- Separação reduz tabelas de roteamento na DFZ
  - Mesmo com a presença de elementos responsáveis pelo mapeamento
- Entretanto...
  - Mapeamento deve lidar com problemas de compatibilidade
  - Nem todos os roteadores separam o espaço de endereçamento

Como considerar a implementação gradual dessa proposta?

Implementação Gradual

- Roteadores de borda que não separam endereços
  - Não realizam o mapeamento e o encaminhamento de pacotes
  - Não anunciam os prefixos das redes de acesso conhecidas
    - Outros roteadores de borda descartam os pacotes recebidos
      - Destinos nessas redes de acesso são desconhecidos

Roteadores de borda desconhecem o caminho até a rede de destino do pacote

Six/One Router

GTA / UFRJ

- Protocolo para tradução de endereços de estações
  - Tradução realizada no roteador de borda da rede de acesso da origem
    - Mapeia o endereço de origem em um endereço da DFZ
    - Resolve o endereço de destino no endereço de destino na DFZ

Mapeamento biunívoco, ou seja, cada endereço de uma estação em uma rede de acesso só pode ser mapeado em um endereço da DFZ

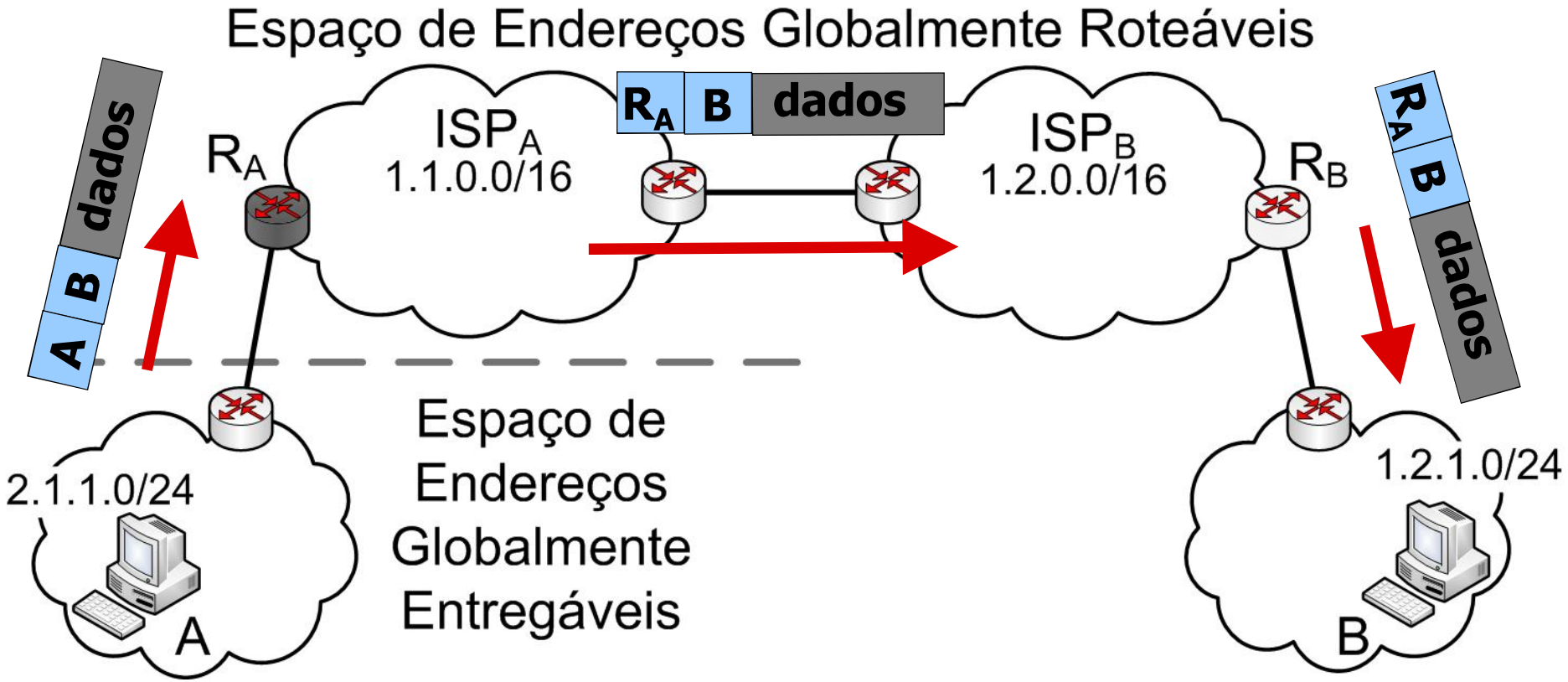
Six/One Router

- Estações de destino em redes de acesso legadas
  - Endereço da estação já é o próprio endereço da DFZ
    - Endereços têm que ser conhecidos globalmente
  - Tradução do endereço retorna o próprio endereço da estação

- Caso uma estação legada seja a origem do pacote
  - Endereço de destino é o endereço da DFZ
    - Estação não conhece os endereços das redes de acesso
    - Entretanto, **mapeamento biunívoco** garante somente uma estação associada a esse endereço da DFZ

Six/One Router

GTA / UFRJ



Recepção na rede legada. Endereço da estação B é da faixa de endereços do ISP_B

HAIR (*Hierarchical Architecture for Internet Routing*)

- Proposta para redução do número de entradas nas tabelas de roteamento da DFZ
  - HAIR divide os diferentes ASes em mais de dois níveis hierárquicos
    - Outras propostas dividem em apenas dois níveis
  - Nível mais alto
    - Composto pelos principais ASes de trânsito da Internet
  - Nível mais baixo
    - Composto pelas redes de acesso

HAIR (*Hierarchical Architecture for Internet Routing*)

- HAIR utiliza técnicas de *Loc/ID Split*
  - Possibilita mobilidade das estações
- Encaminhamento de pacotes é realizado baseado em identificadores
  - Utiliza identificadores para as estações de origem e destino
  - Mapeia em endereços antes do envio dos pacotes

HAIR (*Hierarchical Architecture for Internet Routing*)

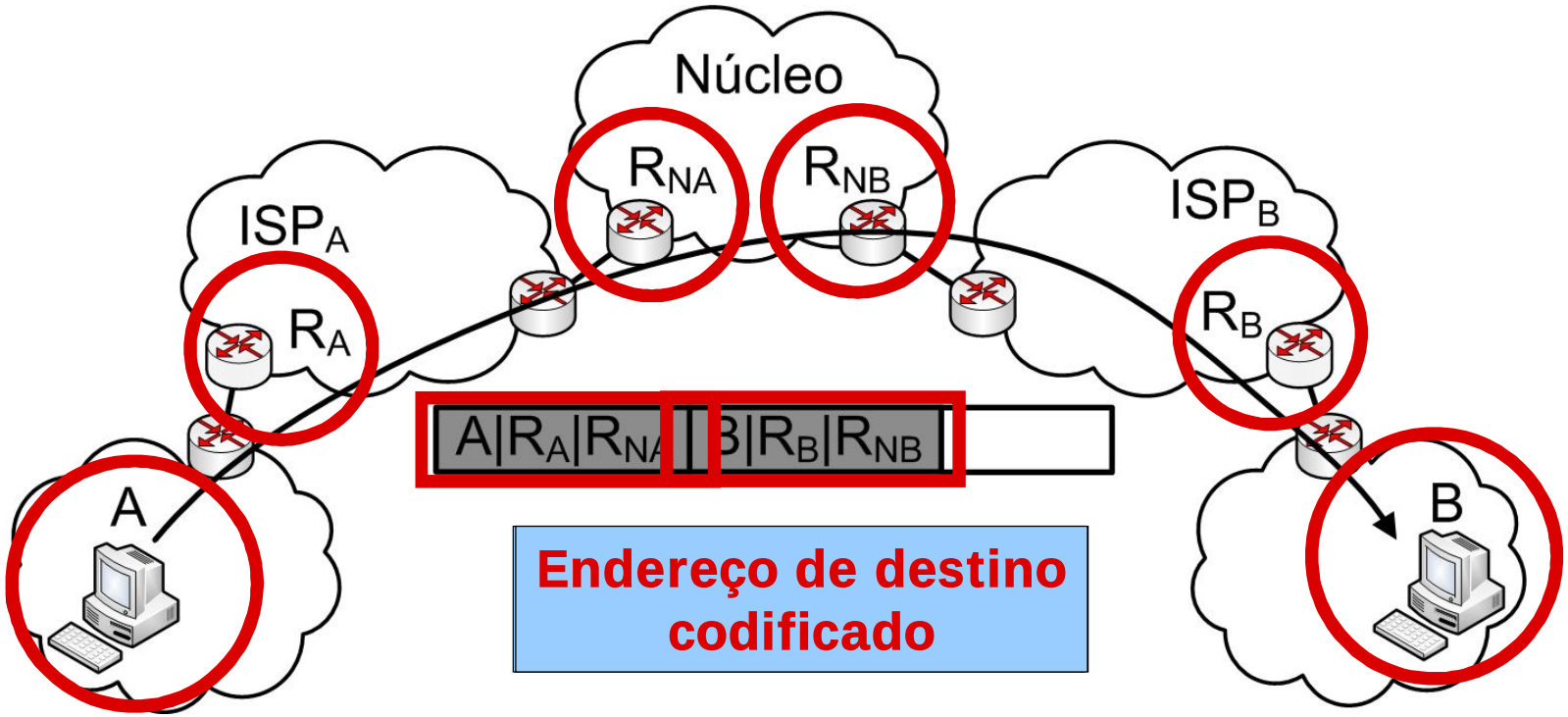
- Endereçamento codificado
  - Endereço de origem codifica identificadores de todos os roteadores de borda pelos quais o pacote passa
    - Desde sua origem até o nível hierárquico superior
  - Endereço de destino codifica os identificadores de todos os roteadores no sentido contrário
    - Desde o nível superior até o destino

Roteamento semelhante a um *loose source routing*, mas sem o uso do campo de opções do IP

HAIR (*Hierarchical Architecture for Internet Routing*)

GTA / UFRJ

- Mapeamento do identificador do destino no endereço
  - Realizado sob requisição
    - Estação de origem conhece o identificador de destino e utiliza um sistema de resolução de identificador em endereço



Estratégias de Organização de Prefixos

- Propostas para aumentar a escalabilidade da Internet
  - Alteram a arquitetura atual de endereçamento
    - Ex.: separação dos espaços de endereçamento
- Outra alternativa:
  - Organizar de maneira mais inteligente os prefixos de rede

Estratégias de Organização de Prefixos

- Armazenamento em memória cache das rotas usadas com frequência
  - Outras rotas são armazenadas em memória mais lenta
    - Consultadas apenas em caso de ausência na cache
- Pacotes sem rota na cache são encaminhados imediatamente em uma rota *default*
  - Não há perda de tempo no encaminhamento
  - Atualização da cache baseada na memória mais lenta

Roteador que recebe o pacote enviado pela rota default deve conhecer caminhos para todos os destinos da rede

Desafios das Estratégias de Organização de Prefixos

- Organização inteligente pode enfrentar dois desafios:
  - Mudanças na arquitetura da Internet são difíceis de serem implementadas
  - Redução das tabelas de roteamento *Vs.* aumento do tamanho médio das rotas
- Crescimento das tabelas de roteamento é logarítmico
  - Se algoritmos para compactação das tabelas forem usados
- Entretanto...
  - Internet deve ser estática e os endereços com significado na topologia
  - Caso contrário, o crescimento das tabelas é acelerado

Caminhos Programáveis

- Novas aplicações com requisitos diferenciados
- Condições variáveis da rede

- Solução possível: mover funções das aplicações para a rede
  - Monitorar o desempenho da rede
  - Movimentar funções das aplicações
  - Escolha de caminhos...
    - **Inteligência** na rede se faz necessária

Inteligência na Rede

- Agentes
  - Sensoriar, raciocinar e atuar
- Decisões → Escolha de Caminhos
  - Baseadas no Plano de Conhecimento
  - Tomadas pelo Agente ou pelo Usuário
  - Propostas
    - Baseadas em Agentes Inteligentes
    - Orientadas ao Usuário

Plano de Conhecimento

- Crescimento da Internet
  - Gerenciamento é uma tarefa cada vez mais complexa
- Agentes autônomos
  - Tomada de decisão sem intervenção humana
  - Relatórios de desempenho para usuários e administradores
- Plano de conhecimento
  - Base de dados
    - Qual melhor configuração de operação **em um dado momento**?
    - Que rota é **adequada** para uma aplicação específica?

New Internet Routing Architecture - NIRA

- Novo roteamento interdomínio
  - Objetivo: dar liberdade para o usuário controlar a rota no nível de sistemas autônomos (AS)
  - Justificativa: a escolha da operadora estimula a concorrência na telefonia de longa distância

Implementação do NIRA

- Rota interdomínio separa em duas partes
  - Do emissor até o núcleo da rede
    - "Emissor escolhe como entrar na Internet"
  - Do núcleo da rede até o destinatário
    - "Destinatário escolhe como sair da Internet"

- Funções necessárias
  - Representação de rotas
  - Mecanismo de divulgação de rotas

Funções do NIRA

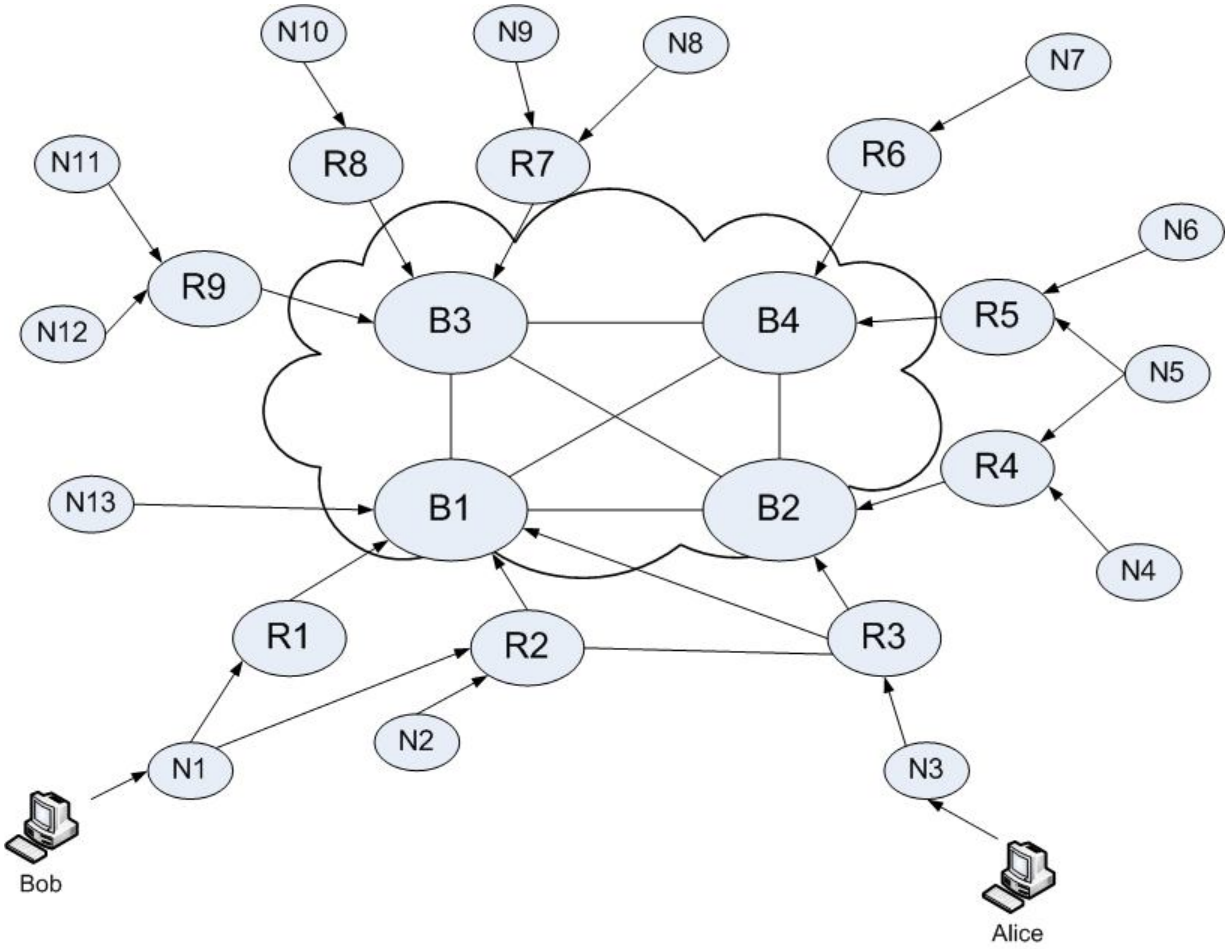
- Representação de rotas
  - Representadas por sequências de prefixos de endereços
  - Hipótese: espaço de endereçamento hierárquico
    - Provedor raiz aloca faixas de endereços não sobrepostas
  - Diferentes rotas de acesso à Internet possuem diferentes sequências de endereços

Divulgação de Rotas

- Para iniciar a comunicação
  - Escolha de uma rota entre uma lista de possíveis rotas para chegar à Internet
    - Lista das rotas devem ser anunciadas ao usuário
      - Possivelmente sem divulgar toda a informação da topologia
  - Escolha de uma rota entre as possíveis rotas para chegar a um destinatário
    - O destinatário deve poder influenciar a escolha da rota para chegar a ele

Exemplo de Rotas no NIRA

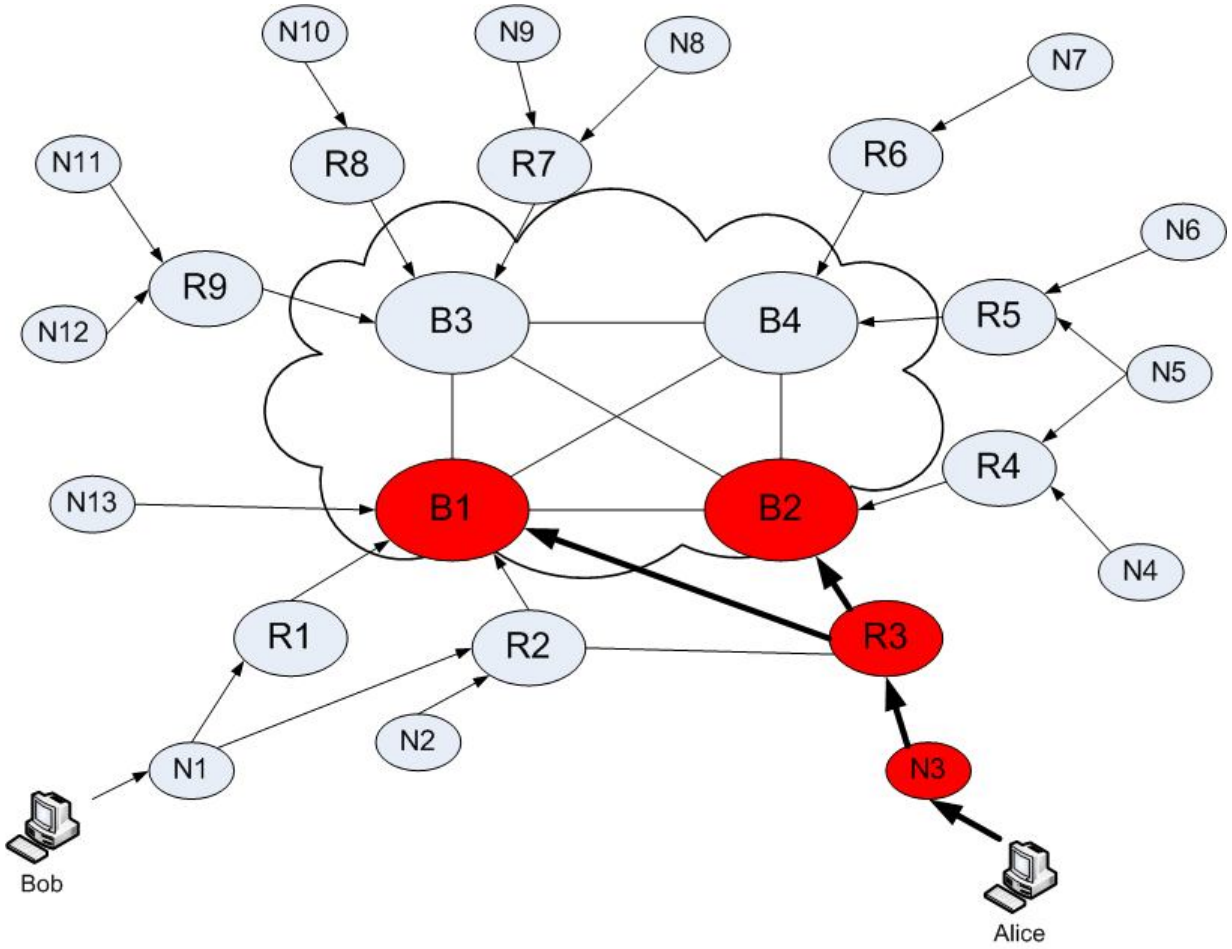
GTA / UFRJ



B1, 2, 3 e 4: roteadores de *backbone*

Exemplo de Rotas no NIRA

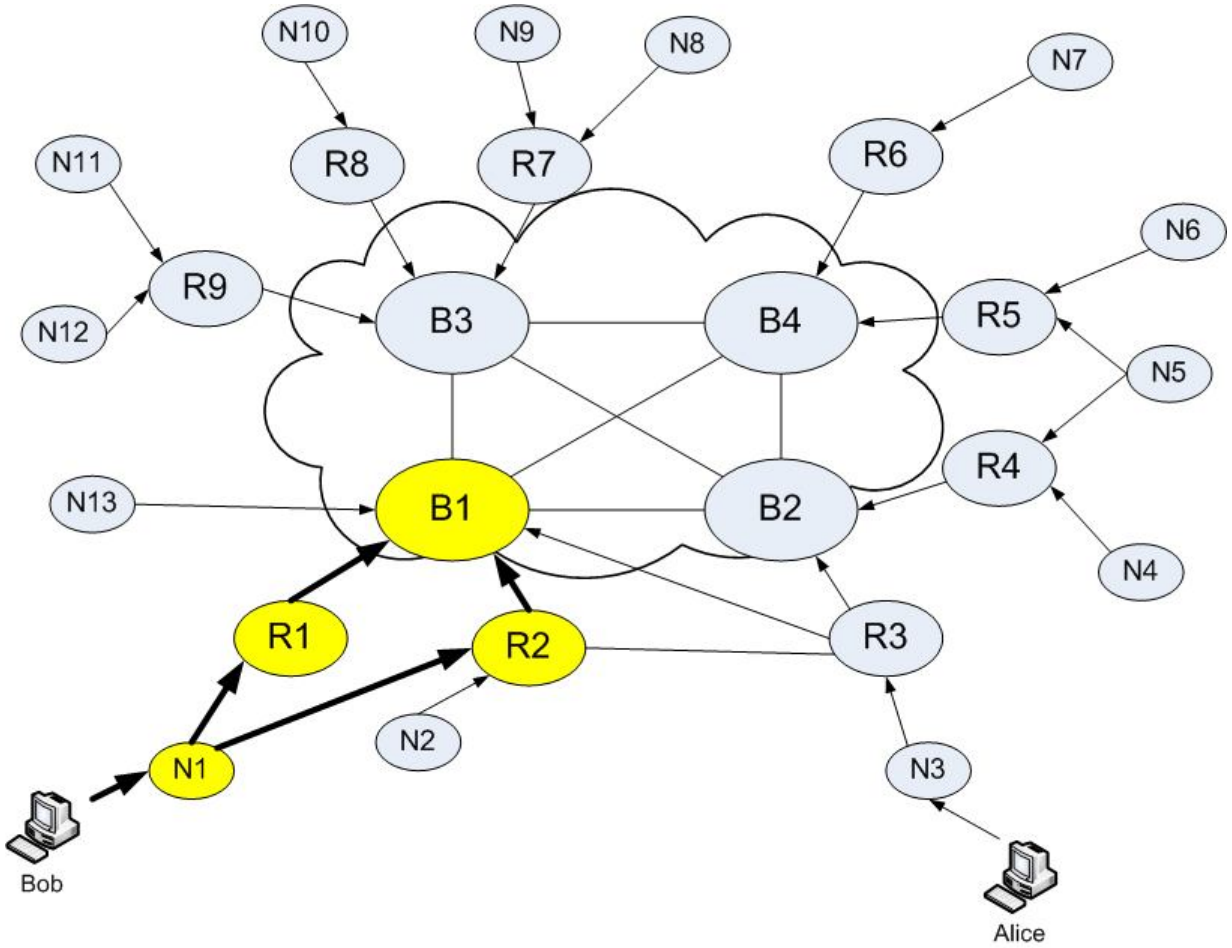
GTA / UFRJ



Alice conhece suas rotas para a Internet

Exemplo de Rotas no NIRA

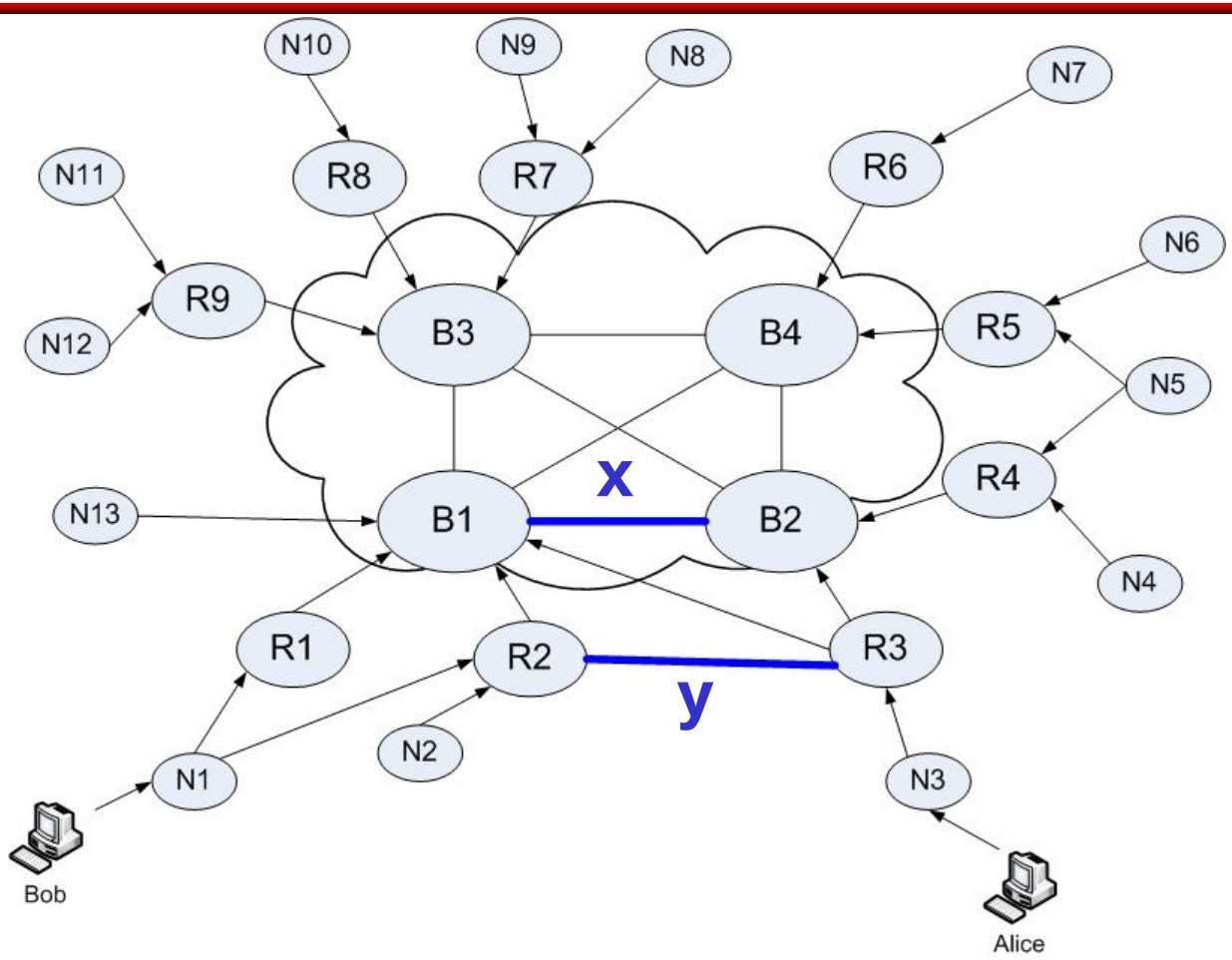
GTA / UFRJ



Bob conhece suas rotas para a Internet

Exemplo de Rotas no NIRA

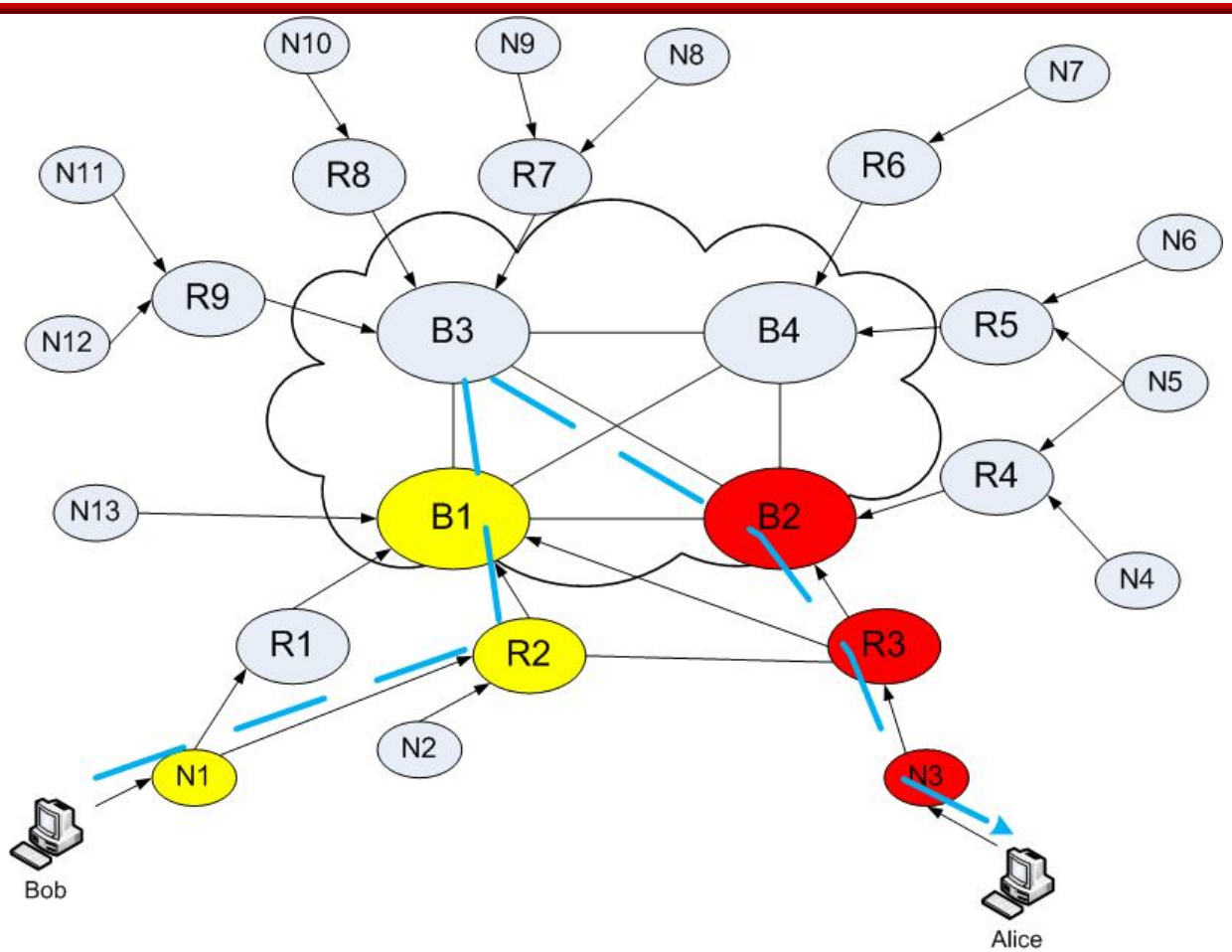
GTA / UFRJ



Só o que deve ser conhecido é divulgado (Ex.: x-y não é)

Exemplo de Rotas no NIRA

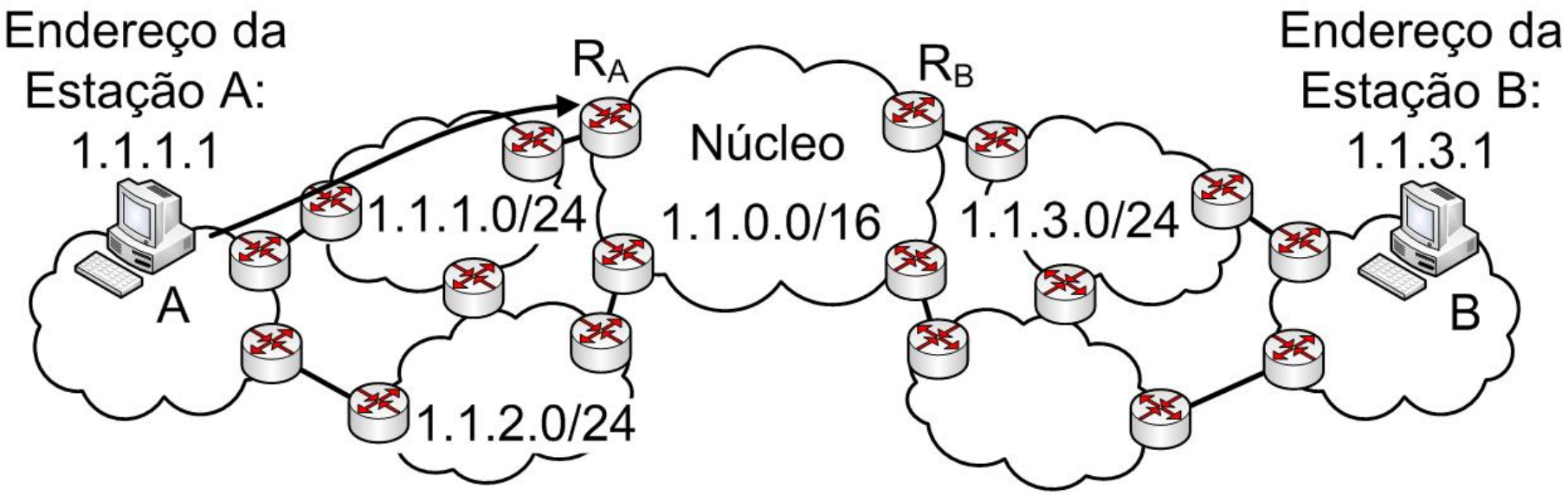
GTA / UFRJ



Bob escolhe uma de suas rotas de saída, e escolhe um dos endereços de Alice para definir como chegar a Alice

NIRA

GTA / UFRJ



Pathlet Routing

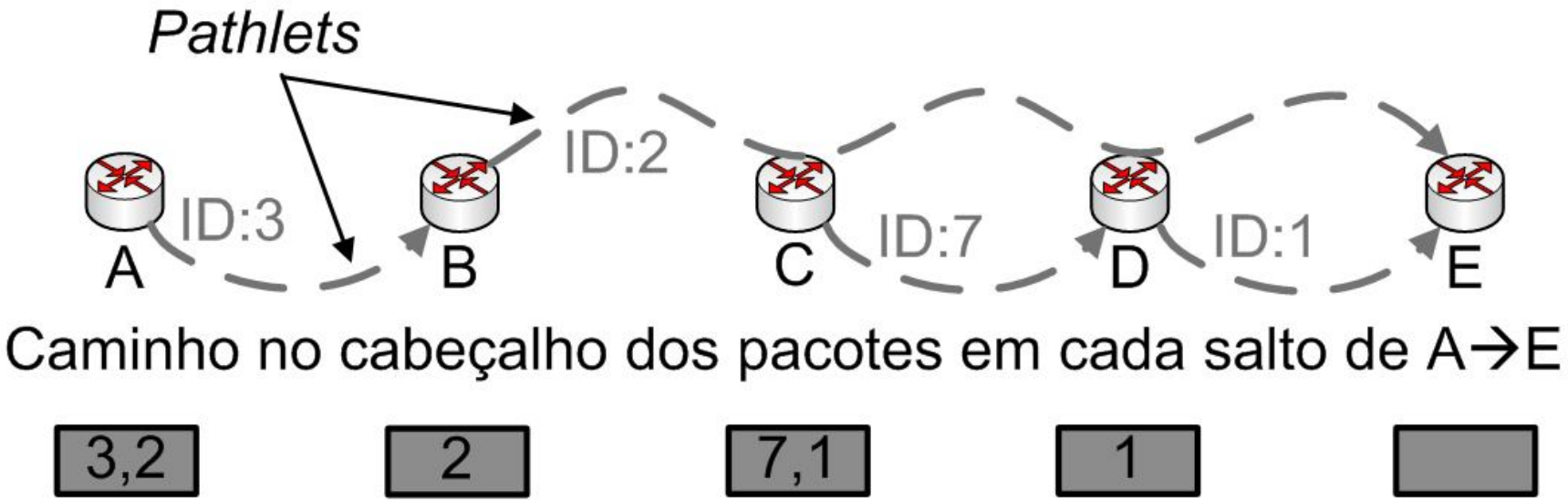
- ISPs anunciam fragmentos de caminhos (*pathlets*)
- Usuário escolhe caminhos compondo *pathlets*
- *Pathlet*
  - Sequência de nós virtuais
    - nó virtual = rotas conhecidas por um roteador
  - Identificados por um identificador de encaminhamento
    - *Forwarding IDentifier* - FID

Funcionamento

- Caminho do pacote definido na fonte
  - Insere o caminho no cabeçalho do pacote
    - *Pathlet Routing* utiliza roteamento pela fonte
- Uso do roteamento pela fonte
  - Torna o *Pathlet* importante apenas para o nó de origem
    - Origem do *Pathlet* deve conhecer para que nó encaminhar os pacotes recebidos
  - Após encaminhar pacotes
    - Roteador altera a sequência de identificadores

Pathlet Routing

GTA / UFRJ



Soluções Comutadas

GTA / UFRJ

- Ethernet
  - Tecnologia consolidada para **redes locais e metropolitanas**
  - É uma solução comutada

Não pode ser aplicada diretamente na Internet que é roteada

Entretanto...

Estímulo ao emprego do Ethernet em redes de maior escala

Soluções Comutadas

GTA / UFRJ

- Motivação
  - Simplicidade e facilidade de configuração
- Modificações necessárias
  - Inundação de controle
    - Localização de estaçã
    - Configuraçã de endereços
      - *amic Host Configuration Protocol*)
      - dução ARP (*Address Resolution Protocol*)
  - Uso de árvores de espalhamento (*spanning trees*)
  - Cada comutador armazena a localização de cada destino

Propostas para aumentar a escalabilidade!

Propostas

- Solução híbrida
  - Roteadores IP para interconectar redes Ethernet
  - VLANs (*Virtual Local Area Networks*)

- Seattle
  - Objetivos
    - Reduzir o número de estados por comutador
    - Evitar inundações
  - Sistemas de localização de estações usando DHTs
    - Não exige o armazenamento de informações globais nos nós da rede

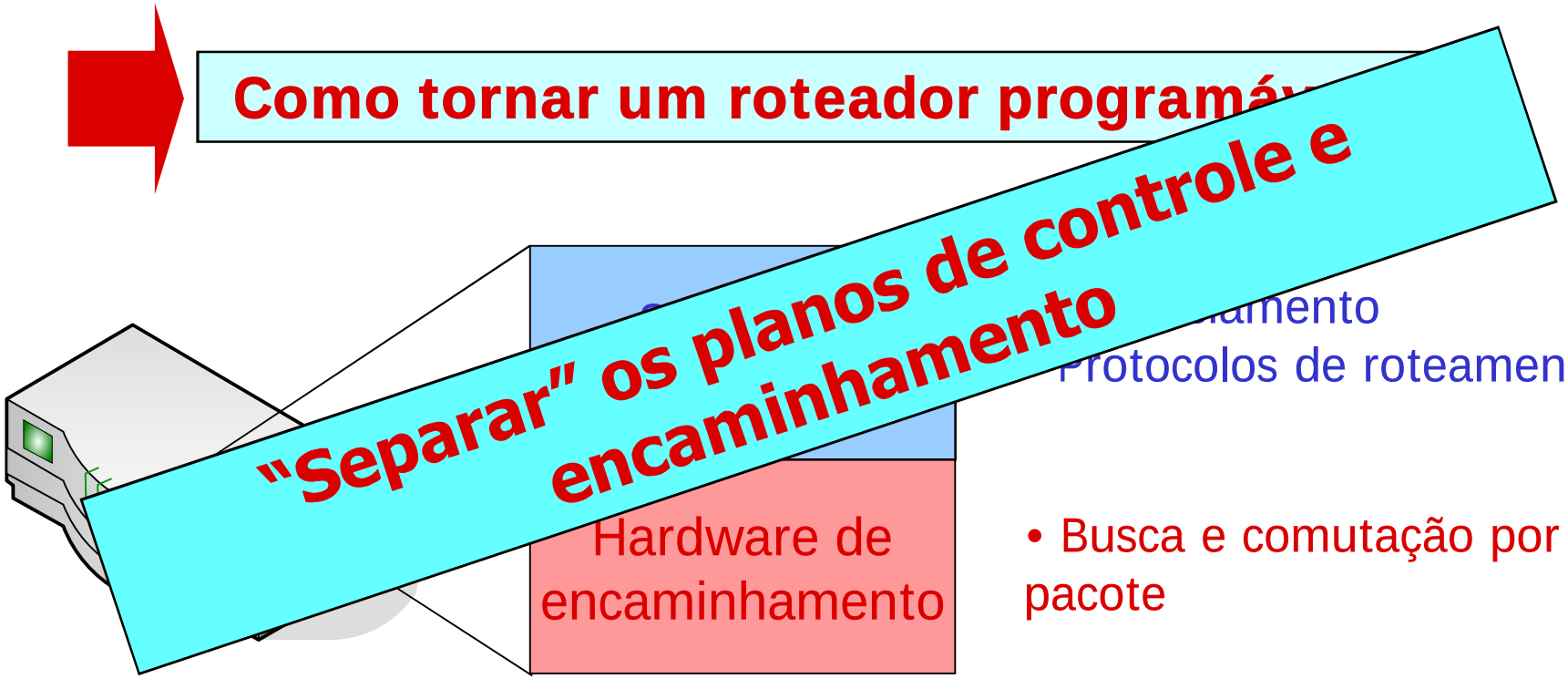
OpenFlow

- Possui grande destaque
- Possibilita a programabilidade de elementos de rede
  - Comutadores
  - Roteadores
  - Etc.
- Realiza experimentos isolados simultâneos
  - Testar novas propostas de roteamento e alternativas ao IP

OpenFlow

GTA / UFRJ

- Arquitetura de um roteador

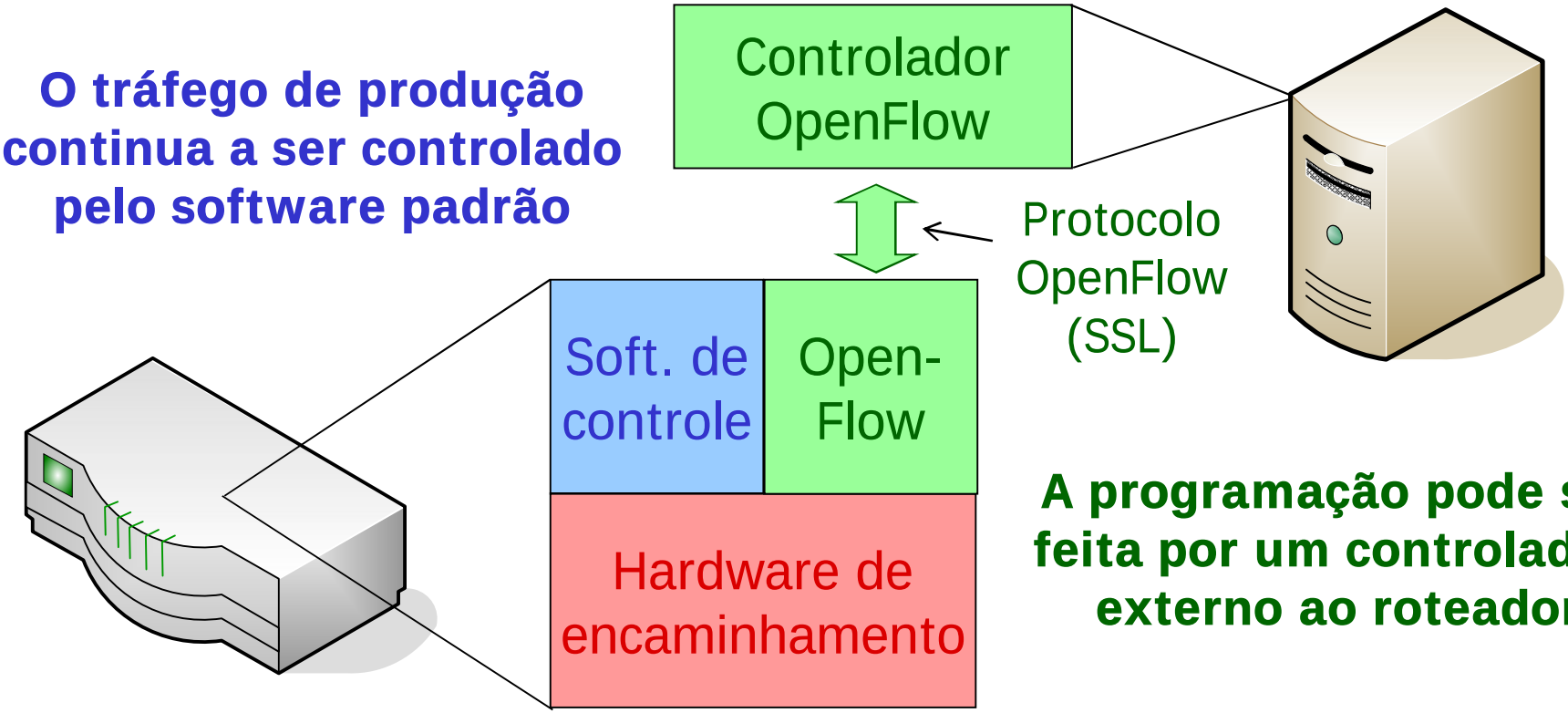


OpenFlow

GTA / UFRJ

- Arquitetura de um roteador

O tráfego de produção continua a ser controlado pelo software padrão



A programação pode ser feita por um controlador externo ao roteador

OpenFlow

- Vantagens do uso do controlador externo
  - Não há dependência do fabricante
    - Facilidade de adoção
  - Código aberto ← **palavra chave**
    - Permite a **inovação**
      - Operadores, usuários e pesquisadores podem desenvolver e **testar** seus protocolos e mecanismos

OpenFlow

- Define uma interface e um protocolo para comunicação entre controladores e comutadores
  - Protocolo define mensagens para
    - **Modificar as tabelas de encaminhamento**
    - Receber e enviar pacotes
    - Buscar estatísticas da rede e informações do elemento de rede

- Utiliza canal de comunicação seguro
  - Utiliza SSL (*Secure Sockets Layer*)
    - Garantir autenticidade e confidencialidade

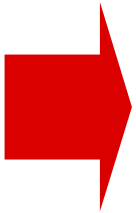
OpenFlow

- Programabilidade → modificar as **tabelas de fluxo**
  - Como são chamadas as tabelas de encaminhamento

- O que é um fluxo?
  - Definição deve ser flexível
    - Fluxo de uma aplicação
    - Todo o tráfego HTTP
    - Tráfego do SBRC
    - Todos os pacotes originados no Brasil
    - Etc.

OpenFlow

- Por que a definição deve ser flexível?
  - Para permitir o teste de soluções que não utilizam o IP como protocolo de rede



O OpenFlow não requer que o cabeçalho dos pacotes siga um dado formato

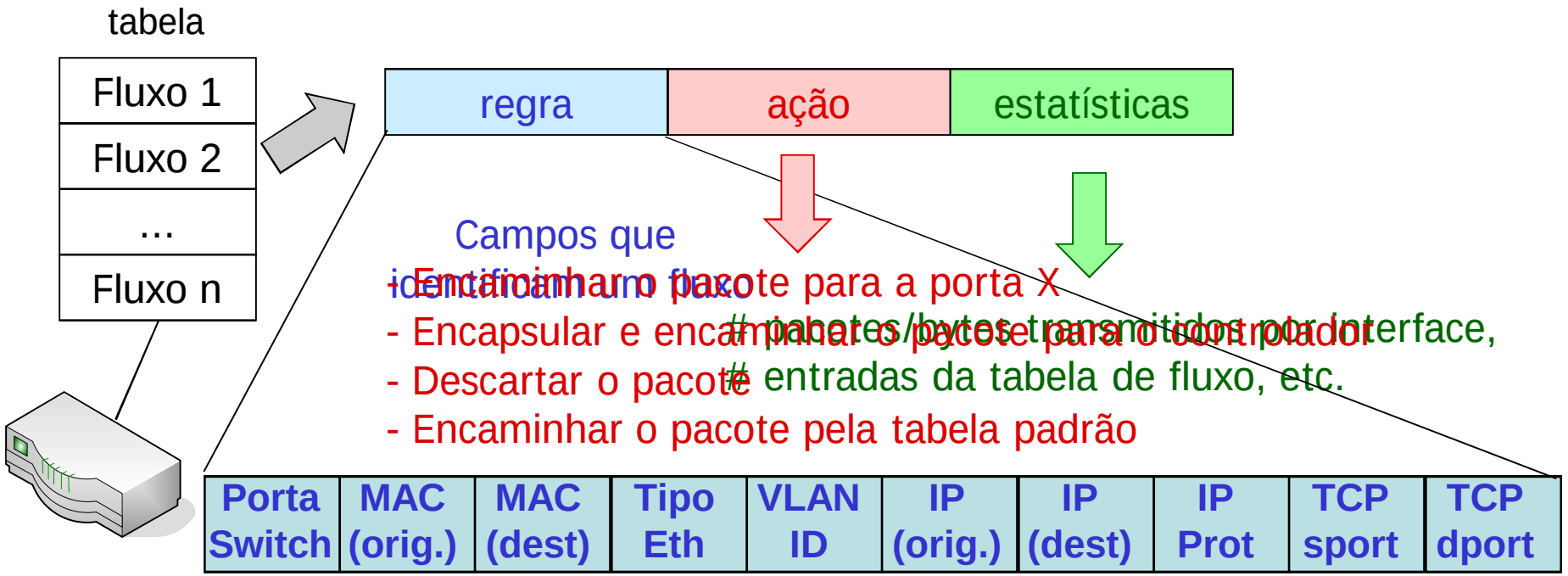
- Espaço de fluxos (Flowspace)
  - Um fluxo pode ser definido por qualquer combinação dos dez campos

Porta Switch	MAC (orig.)	MAC (dest)	Tipo Eth	VLAN ID	IP (orig.)	IP (dest)	IP Prot	TCP sport	TCP dport

OpenFlow

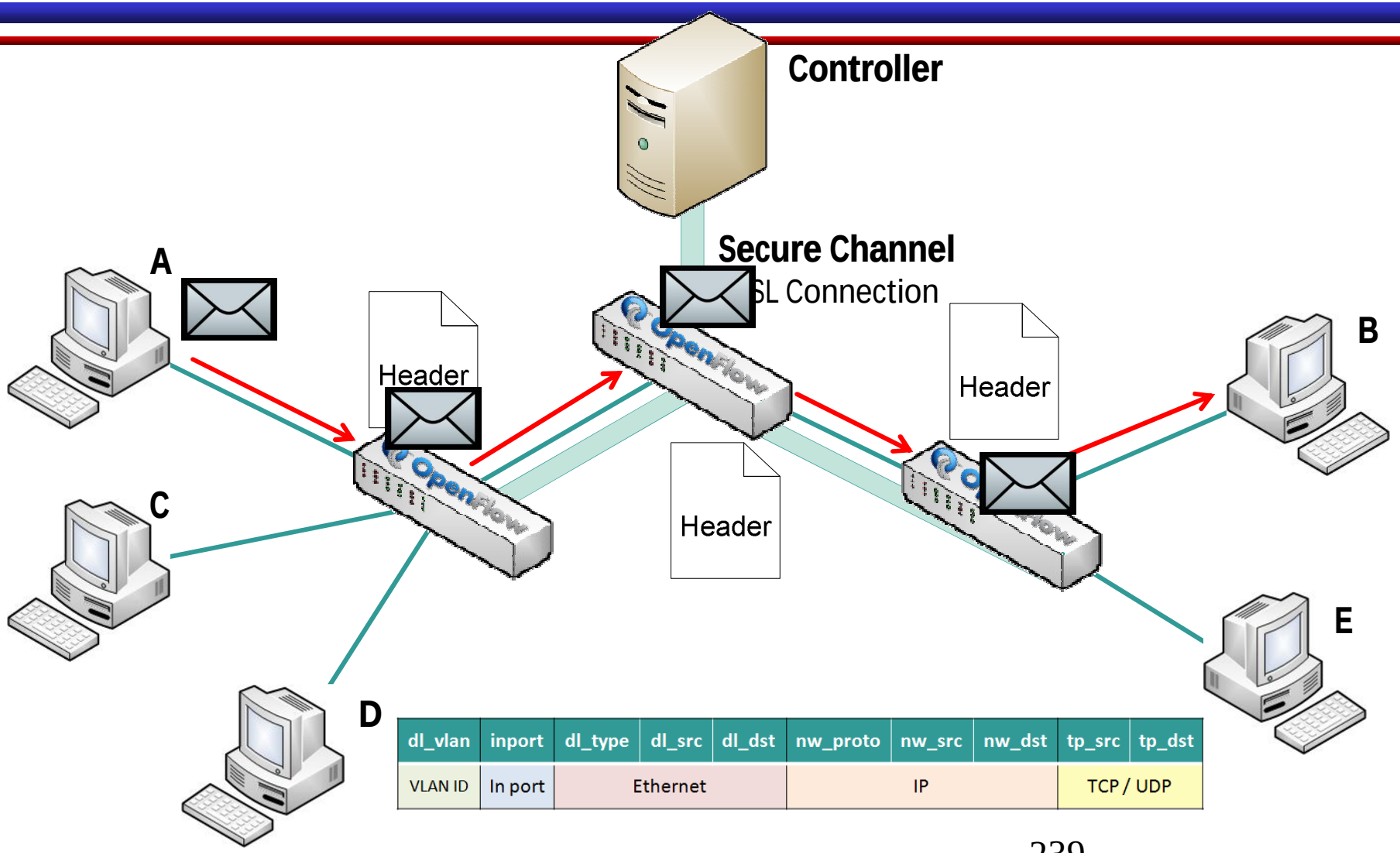
GTA / UFRJ

- Tabela de fluxos
  - É uma lista dos fluxos conhecidos por cada elemento
  - Para cada fluxo: regras, ações e estatísticas



OpenFlow Architecture

GTA / UFRJ

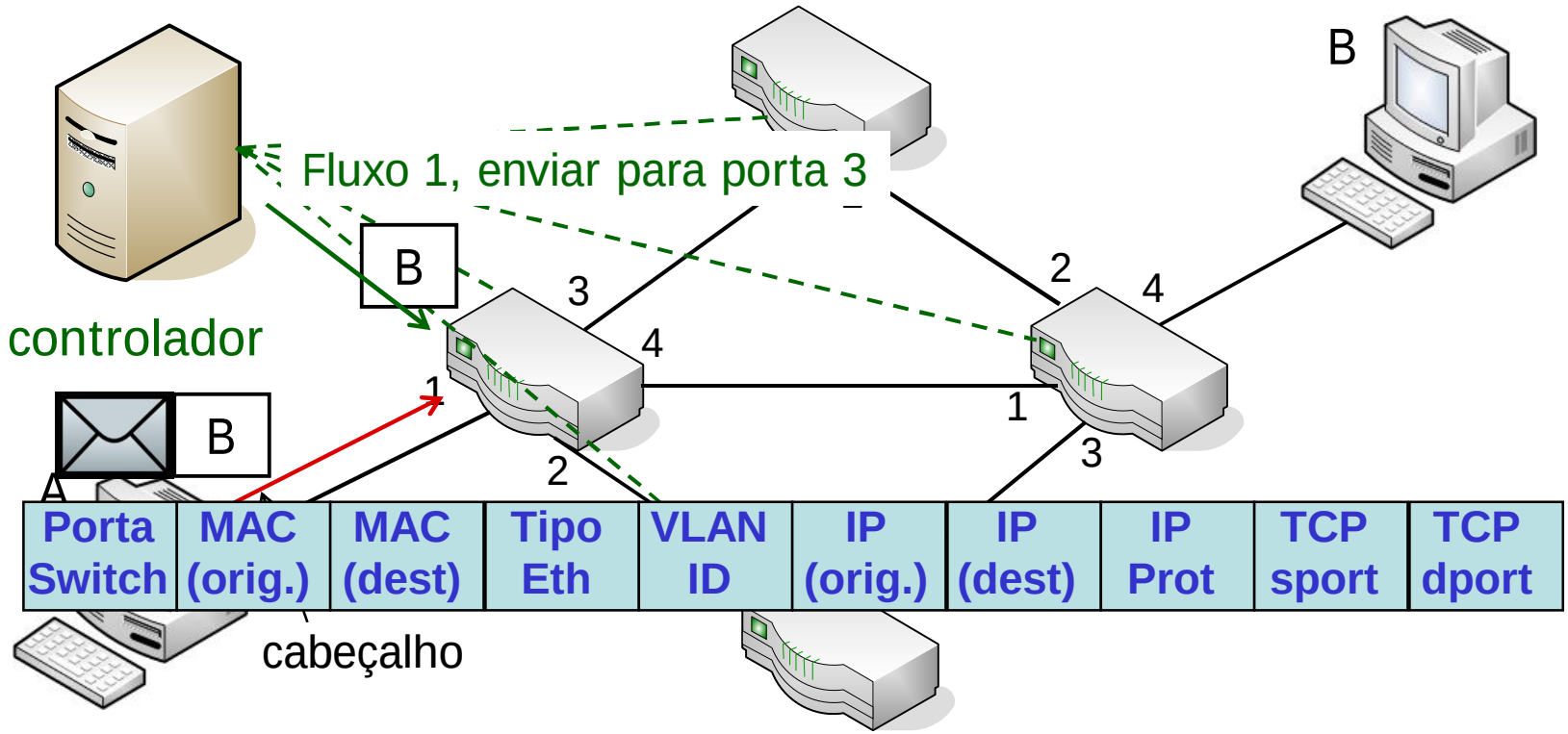


dl_vlan	inport	dl_type	dl_src	dl_dst	nw_proto	nw_src	nw_dst	tp_src	tp_dst
VLAN ID	In port	Ethernet			IP			TCP / UDP	

OpenFlow

GTA / UFRJ

- Arquitetura da rede
  - **Separação** do controle e do encaminhamento



OpenFlow

GTA / UFRJ

- Desvantagem
  - Controle **centralizado**
    - Compromisso entre escalabilidade e facilidade de gerenciamento

OpenFlow proposto originalmente para redes de *campi* universitários

- É possível usar mais de um controlador
  - FlowVisor
    - Controladores associados a redes diferentes
    - Compartilhamento de recursos físicos entre diferentes redes isoladas

OpenFlow

- **Falar que o GTA já tem um testbed OpenFlow?**
- **Colocar uma foto?**
- **Colocar um print screen da interface?**

Roteiro

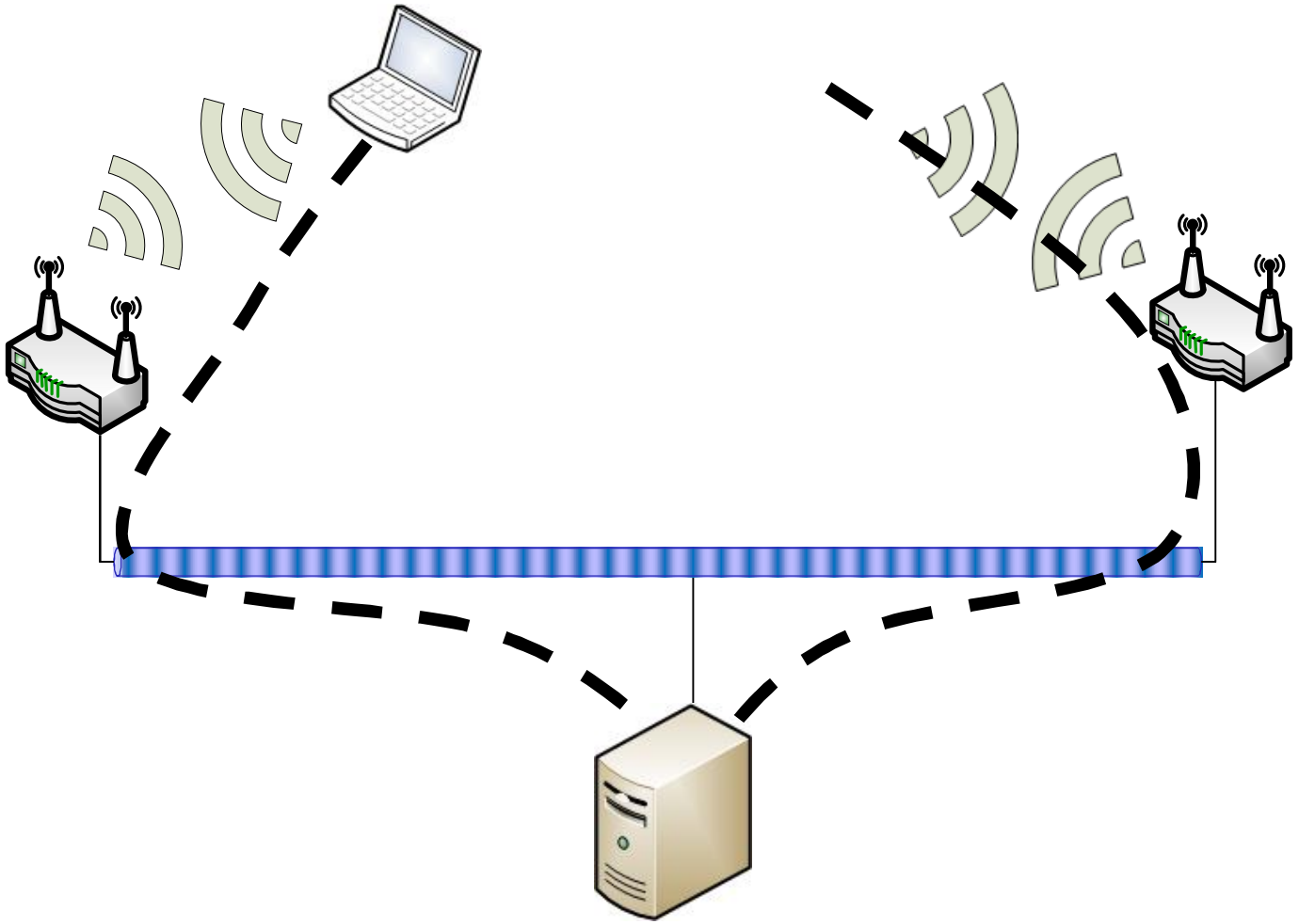
- Introdução
- Arquitetura atual da Internet
- Desafios em Interconexão de Redes
- Propostas para a Interconexão de Redes
- **Resultados Experimentais**
- Considerações Finais

Resultados Experimentais

- Avaliação de solução de mobilidade
- Testes realizados
  - HIP – *Host Identity Protocol*
    - Separação de Identificador e Localizador
    - OpenHIP

Cenário de Testes

GTA / UFRJ



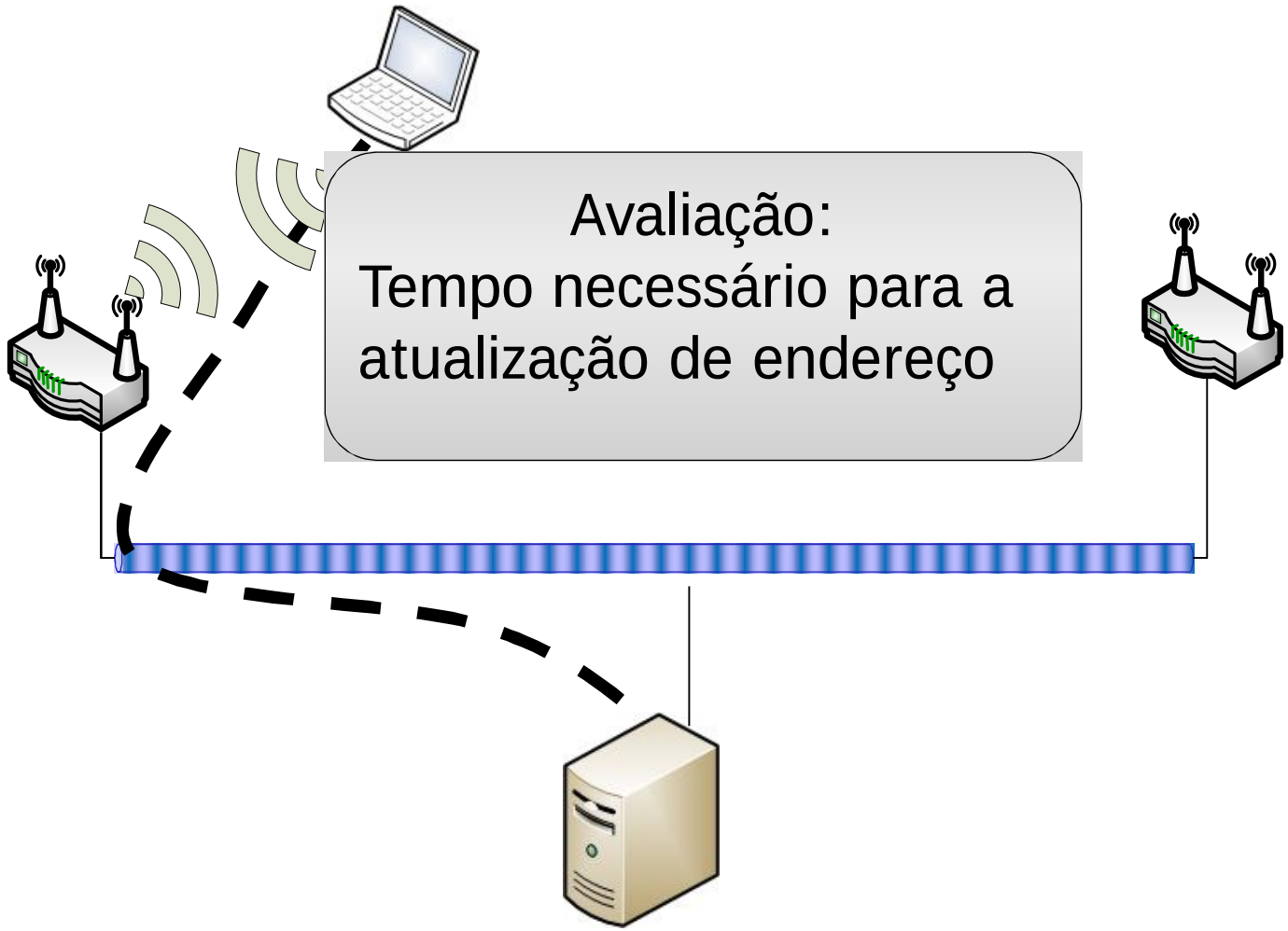
Cenário de Testes

- Estação móvel
  - IBM ThinkPad Pentium M 1.7 GHz
  - 512 MB RAM
- Servidor
  - Intel Core2 Duo 2.4 GHz
  - 2 GB RAM
- Pontos de Acesso
  - Linksys WRT54G
  - Linksys WRT350N

Primeiro Teste

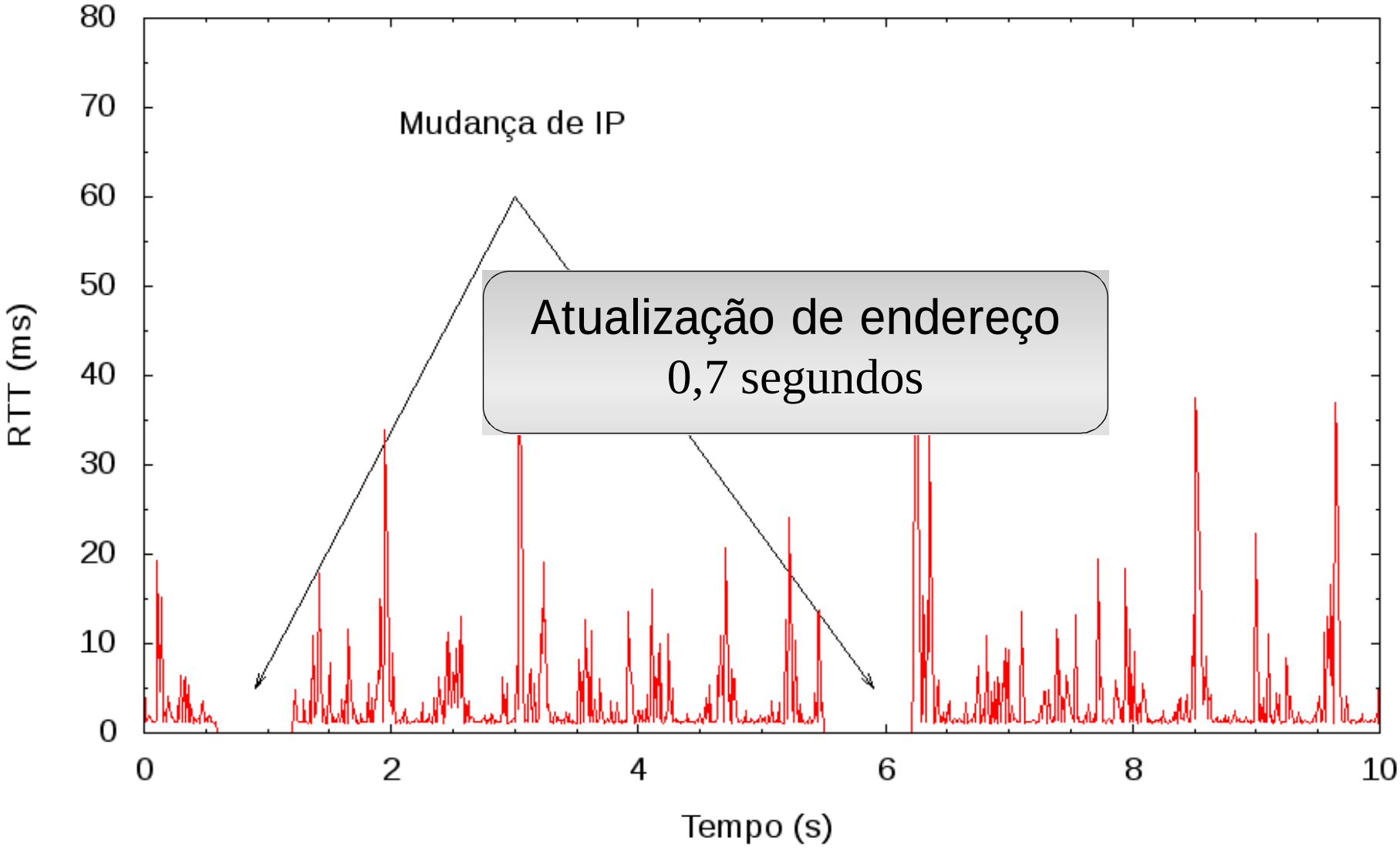
GTA / UFRJ

```
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
```



Primeiro Teste - Resultado

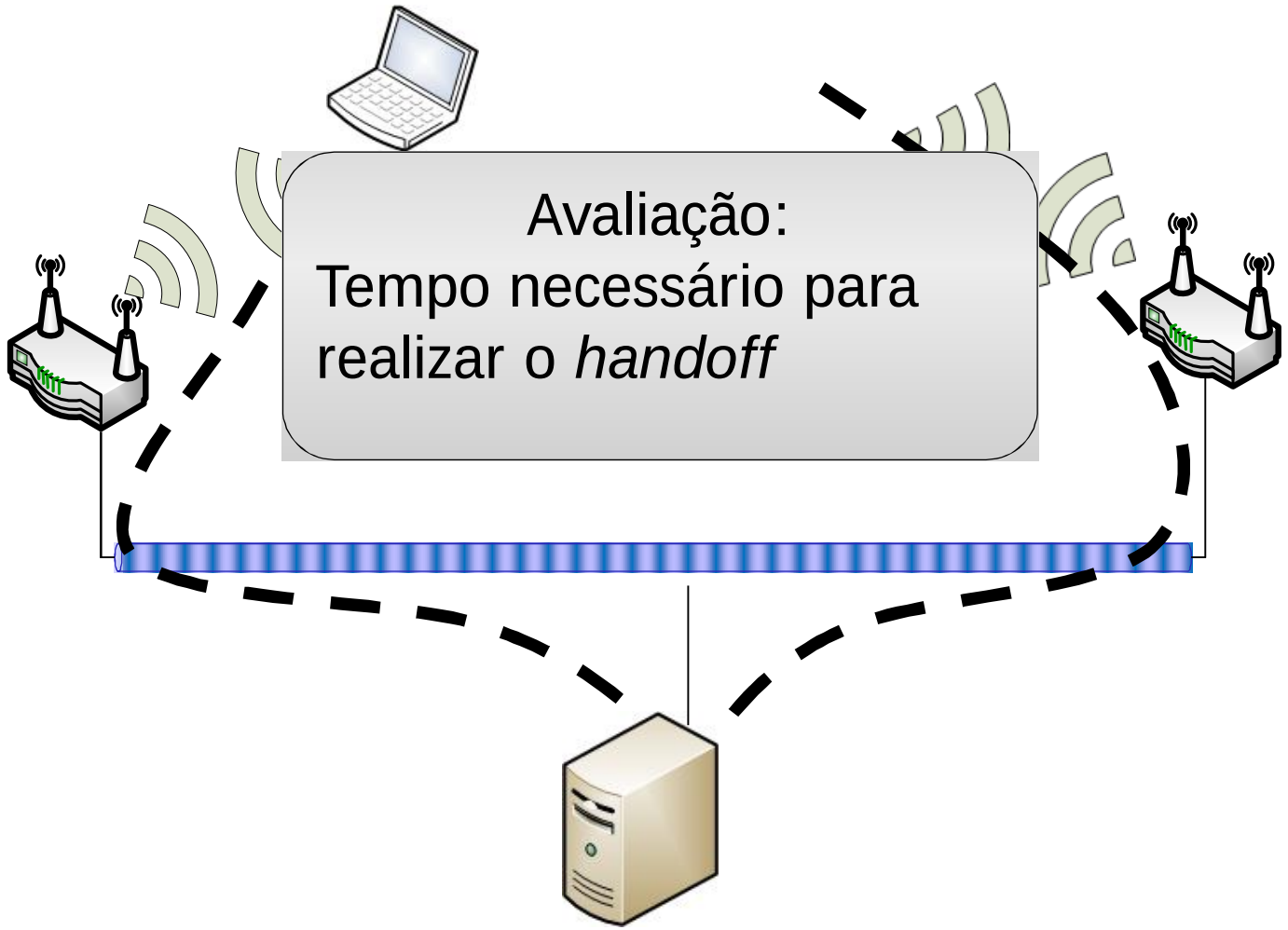
GTA / UFRJ



Segundo Teste

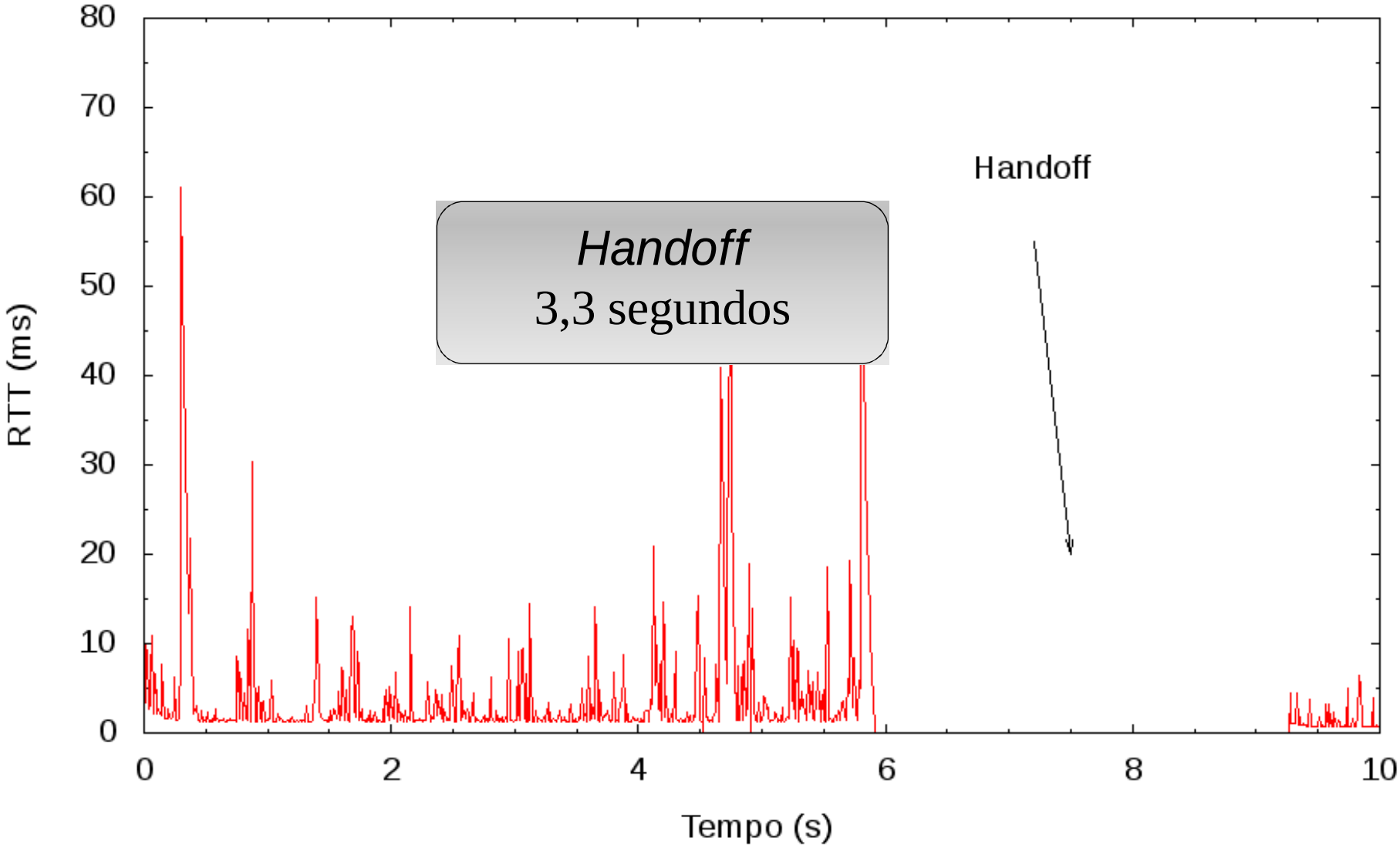
GTA / UFRJ

```
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
ping!
```



Segundo Teste - Resultado

GTA / UFRJ



Resultados Experimentais

- Mobilidade
  - Atualização de endereços e *Handoff*
    - Longo tempo de mudança de IP
  - Possível
    - Alguns ajustes devem ser feitos

Roteiro

- Introdução
- Arquitetura atual da Internet
- Desafios em Interconexão de Redes
- Propostas para a Interconexão de Redes
- Resultados Experimentais
- **Considerações Finais**

Considerações Finais

- Ao longo dos anos, a Internet vem sofrendo adaptações
  - Mudanças procuram atender demandas não previstas originalmente
    - Tais mudanças são realizadas a partir de duas abordagens
      - **Adaptação / Substituição**
      - **Rompimento**

Considerações Finais

- **Propostas de adaptação**
  - Substituem e adaptam o IP e os principais protocolos de roteamento intra e interdomínio
    - **Vantagem:** Gera mudanças gerenciáveis pelos provedores
    - **Problema:** Requer sempre adaptar a Internet a uma realidade em constante evolução
- **Propostas de rompimento**
  - Rompem com o projeto inicial da Internet e adotam uma arquitetura totalmente inovadora
    - **Vantagem:** Pode usar experiência já adquirida a favor e pode ser vantajoso no longo prazo
    - **Problema:** Exige maiores dispêndios financeiros dos ISPs

Considerações Finais

- Enquanto impasse persiste...
  - Demandas emergentes continuam sem solução
    - Mobilidade das estações
    - Múltiplos domicílios
    - Múltiplos caminhos
    - Escalabilidade
    - Programabilidade

Considerações Finais

- Propostas atuais
  - Algumas mais preocupadas com implementação gradual
    - Embora ainda necessitem de mudanças na rede
- Problema ainda persiste
  - Complexidade muito elevada
    - Talvez não seja possível atender todas as demandas
      - Ainda ser escalável
      - Financeiramente factível
      - Etc.
  - Algumas demandas podem continuar como casos a parte
    - Mesmo naquela que será a Internet do Futuro

Considerações Finais

GTA / UFRJ

- Requisito maior:

Nova solução deve manter as mesmas características que fizeram da Internet um dos maiores sucessos do século XX

Será possível?
É um desafio em aberto para os próximos anos?
Décadas?

Nós entramos nessa, alguém mais?

Obrigado!

Departamento de Eletrônica – Escola Politécnica
Programa de Engenharia Elétrica – COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Interconexão de Redes na Internet do Futuro: Desafios e Soluções

Miguel Elias M. Campista, Lyno Henrique G. Ferraz,
Igor M. Moraes, Marcelo Luiz D. Lanza,
Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

http://www.gta.ufrj.br

Este trabalho utilizou recursos da CAPES, CNPq, FAPERJ, FUJB, FUNTTEL e FINEP